

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta stavební

Katedra konstrukcí

Analýza styčníků ocelových konstrukcí s využitím metody konečných prvků

Analysis of joints in steel structures using the finite element method

Student:

Bc. Milan Foniok

Vedoucí bakalářské práce:

doc. Ing. Vít Křivý, Ph.D.

Ostrava 2016

DIPLOMOVÁ PRÁCE

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta stavební
Katedra konstrukcí

Zadání diplomové práce

Student: **Bc. Milan Foniok**

Studijní program: N3607 Stavební inženýrství

Studijní obor: 3607T037 Konstrukce staveb

Téma: Analýza styčníků ocelových konstrukcí s využitím metody konečných prvků
Analysis of joints in steel structures using the finite element method

Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

V rámci diplomové práce:

1. Vypracujte stručnou rešerši o normativních přístupech, které lze využít k analýze styčníků ocelových konstrukcí.
2. S využitím software Scia Engineer proveďte geometricky a materiálově nelineární analýzu minimálně 3 běžně užívaných spojů ocelových konstrukcí. Při vyhodnocení mezních stavů únosnosti využijte kritéria přípustných poměrných deformací. Výsledky analýzy srovnajte s výsledky analytického výpočtu podle normy ČSN EN 1993-1-8.
3. S využitím software Scia Engineer proveďte geometricky a materiálově nelineární analýzu minimálně 3 spojů ocelových konstrukcí, u kterých nelze jednoznačně aplikovat analytické modely uvedené v ČSN EN 1993-1-8.
4. Práci doplňte o analýzu rámového rohu realizovaného u příčných vazeb Zimního stadiónu v Opavě.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1] ČSN EN 1990: Zásady navrhování konstrukcí. Praha: ČNI, 2004.
- [2] ČSN EN 1991-1-X: Zatížení konstrukcí (příslušné části). Praha: ČNI.
- [3] ČSN EN 1993-1-1: Navrhování ocelových konstrukcí – Část 1-1: Obecná pravidla pro pozemní stavby. Praha: ČNI, 2006.
- [4] ČSN EN 1993-1-8: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-8: Navrhování styčníků. Praha: ČNI, 2006.
- [5] ČSN EN 1993-1-5 Eurokód 3: Navrhování ocelových konstrukcí - Část 1-5: Boulení stěn. Praha, UNMZ, 2008.
- [6] Wald, F., Sokol, Z. Navrhování styčníků. Vydavatelství ČVUT, Praha 1999.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Formální náležitosti a rozsah diplomové práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí diplomové práce: **doc. Ing. Vít Křivý, Ph.D.**

Datum zadání: 29.02.2016

Datum odevzdání: 30.11.2016



doc. Ing. Antonín Lokaj, Ph.D.
vedoucí katedry

prof. Ing. Radim Čajka, CSc.
děkan fakulty

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a uvedl jsem všechny podklady a literaturu.

V Ostravě

.....

podpis studenta

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Prohlašuji:

- byl jsem seznámen s tím, že na moji diplomovou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 sb. – autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́доміі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen VŠB-TUO) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě diplomovou práci užít (§ 35 odst. 3).
- Souhlasím s tím, že údaje o diplomové práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – diplomovou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́доміі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Anotace:

Předmětem diplomové práce je analýza ocelových styčníků metodou konečných prvků. Vybrané ocelové styčníky jsou spočteny dle normových vztahů ČSN EN 1993-1-8, pokud to podmínky normy dovolují. Dále je provedena analýza numerických modelů lineárním a nelineárním výpočtem, které byly srovnávány s normovými postupy. Návrh řešených styčníků je proveden dle poměrných či plastických přetvoření, které udává norma ČSN EN 1993-1-5. Toto posouzení se řídí metodou GMNA. Tato metoda je blíže specifikována normou ČSN EN 1993-1-6. V diplomové práci je popsána tvorba numerických modelů a jejich pravidla pro jejich správné a korektní vytvoření. Pro vytvoření numerických modelů je použit statický software Scia Engineer.

Anotation:

Main topic of thesis is the analysis of steel nodes by finite element method. These steel nodes are calculated according to the normative CSN EN 1993-1-8, if conditions are permitted by the standards. After that, there is performed analysis of numerical model of linear and nonlinear calculations, which were compared with standard procedures. Suggestion of solved nodes is made according to relative or plastic deformation, which contains standard CSN EN 1993-1-5. This assessment is govern by GMNA method. This method is further specified by standards CSN EN 1993-1-6. Thesis describes creating of numerous models and their rules for correct formation. Numerous model was created by applying statically software Scia Engineer.

Klíčová slova: Styčníky, Metoda komponent, Numerický model, Scia Engineer, Rámový roh, Poměrné přetvoření, Tuhost

Key words: Joints, Numerical model, Scia Engineer, Relative deformation

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Seznam použitého značení:

$S_{j,ini}$	Pružná rotační tuhost
E	Modul pružnosti v tahu a tlaku
I_y	Moment setrvačnosti
K_b	Střední hodnota I_b/L_b pro všechny nosníky nad uvažovaným podlažím
K_c	Střední hodnota I_c/L_c pro všechny sloupy nad uvažovaným podlažím
I_b	Moment setrvačnosti nosníku
I_c	Moment setrvačnosti sloupu
L_b	Rozpětí nosníku (mezi středy sloupů)
L_c	Výška podlaží (sloupu)
$M_{b,pl,Rd}$	Návrhová plastická momentová únosnost nosníku
$M_{c,pl,Rd}$	Návrhová plastická momentová únosnost sloupu
δ	Deformace
W_{pl}	Průřezový modul
f_y	Mez kluzu
L_{eff}	Efektivní délka
t	Tloušťka
γ_{M0}	Součinitel spolehlivosti
γ_{M1}	Součinitel spolehlivosti
d_w	Průměr hlavy šroubu
d_1	Šířka matice
d_2	Šířka matice
A	Plocha
A_s	Plocha šroubu
f_{ub}	Pevnost šroubu
γ_{M2}	Součinitel spolehlivosti
f_u	Pevnost oceli
V_e	Virtuální práce vnějších sil
$V_{i,o}$	Virtuální práce po obvodě kruhu
φ	Natočení
$F_{T,Rd}$	Únosnost náhradního T profilu v tahu
t_{bp}	Tloušťka příložky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

$V_{wp,Rd}$	Návrhová smyková síla pro nevyztuženou stěnu
A_{vc}	Smyková plocha
d_s	Osová vzdálenost výztuh
$M_{pl,fc,Rd}$	Návrhová plastická únosnost pásnice sloupu
$M_{pl,st,Rd}$	Návrhová plastická únosnost výztuhy
ω	Redukční součinitel interakce se smykem
β	Převodní součinitel
$b_{eff,t,wc}$	Účinná výška stěny sloupu v tahu
k_{wc}	Redukční součinitel zohledňující vliv normálového napětí
ρ	Součinitel boulení stěny
h_b	Výška připojovaného nosníku
t_{fb}	Tloušťka pásnice připojovaného nosníku
$M_{c,Rd}$	Únosnost nosníku v ohybu
$b_{eff,t,wb}$	Účinná výška stojiny
a	Výška svaru
m_{px}	Parametr pro účinné délky
m_{p1}	Parametr pro účinné délky
m_{p2}	Parametr pro účinné délky
m_{c1}	Parametr pro účinné délky
s_s	Šířka výztuhy
z_{min}	Rozměr smykového pole
$V_{wp,add,Rd}$	Příspěvek výztuhy k smykové únosnosti
$k_{eff,i}$	Účinný součinitel tuhosti
z_{eq}	Náhradní rameno vnitřních sil
k_{eq}	Náhradní součinitel tuhosti
$\varepsilon_{m,pl}$	Plastické poměrné přetvoření
ε_{tot_M}	Celkové poměrné přetvoření
ε_{pl_M}	Plastické poměrné přetvoření
$\varepsilon_{pl,celk}$	Celkové plastické poměrné přetvoření
τ_{xy}	Smykové napětí
k_φ	Rotační tuhost

DIPLOMOVÁ PRÁCE

ϕ	Pootočení
$N_{1,Rd}$	Návrhová normálová síla pro plastifikaci pásu
$N_{i,Rd}$	Návrhová normálová síla pro porušení mezipásového prutu
b_{eff}	Efektivní šířka
$N_{i,Rd}$	Návrhová síla pro smyk pásu
G_k	Charakteristické stálé zatížení od střešního pláště
S_k	Charakteristické zatížení sněhem
W_k	Charakteristické zatížení větrem

Obsah

1. Úvod	5
2. Klasifikace styčníků	5
2.1. Klasifikace styčníků podle tuhosti	5
a) Kloubové styčníky	5
b) Tuhé styčníky	5
c) Polotuhé styčníky	5
d) Klasifikační hranice	6
2.2. Klasifikace styčníků podle únosnosti	7
a) Kloubové styčníky	7
b) Styčníky s plnou únosností	7
3. Analýza styčnicku	8
3.1. Pružná globální analýza	8
4. Metoda komponent	9
4.1. Náhradní T profil	11
Typy porušení náhradního T profilu	11
i. Porušení se čtyřmi plastickými klouby	11
ii. Porušení se čtyřmi plastickými klouby se zahrnutím matice či hlavy šroubu	12
a) Porušení s dvěma plastickými klouby	13
b) Porušení šroubů	14
4.2. Shrnutí porušení náhradního T profilu	14
4.3. Účinná délka náhradního T profilu	15
4.4. Příspěvek příložky k únosnosti	19
4.5. Stěna sloupu ve smyku	19
4.6. Stěna sloupu v tahu a tlaku	21
a) Stěna sloupu v příčném tahu	21
b) Stěna sloupu v příčném tlaku	22

DIPLOMOVÁ PRÁCE

4.7.	Pásnice a stojina nosníku v tlaku a tahu	23
a)	Pásnice a stojina nosníku v tlaku	23
b)	Stěna nosníku v tahu	23
5.	Analýza rámového rohu	24
5.1.	Výpočet rámového rohu metodou komponent	24
a)	Návrh svarů	24
b)	Určení parametrů pro účinné délky	25
c)	Stojina nosníku v tahu	25
i.	Únosnost 1. řady šroubů	25
ii.	Únosnost 2. řady šroubů	29
d)	Tlačená oblast styčnicku	32
i.	Stěna sloupu v příčném tlaku	32
ii.	Pásnice a stojina nosníku v tlaku	32
iii.	Návrh výztuhy	33
e)	Panel stěny sloupu ve smyku	33
i.	Návrh výztuhy	34
f)	Návrhová momentová únosnost styčnicku	34
g)	Návrhová smyková únosnost styčnicku	36
h)	Rotační tuhost styčnicku	36
i)	Výsledná rotační pružná tuhost styčnicku	38
i.	Pro styčník bez výztuh	38
ii.	Pro styčník s výztuhou v tlačené oblasti	38
iii.	Pro styčník s výztuhami v tlačené a smykové oblasti	38
j)	Výpočet deformace u_z pro ohybový moment $M = 100 \text{ kNm}$	38
i.	Pro styčník bez rotační tuhosti	38
ii.	Model 1 - styčník bez výztuh	38
iii.	Model 2 - styčník s výztuhami v tlačené oblasti	38

DIPLOMOVÁ PRÁCE

iv.	Model 3 a 4 - styčník s výztuhami v tlačené a smykové oblasti.....	39
5.2.	Skořepinový model rámového rohu	40
a)	Tvorba skořepinového modelu.....	40
5.3.	Výsledky skořepinového modelu	44
a)	Elastický materiál.....	44
b)	Pružno-plastický materiál	51
i.	Model 1 - Styčník bez výztuh.....	53
ii.	Model 2 - Styčník s výztuhami v tlačené oblasti	57
iii.	Model 3 - Styčník s výztuhami u obou pásnic příčle.....	60
iv.	Model 4 - Styčník se smykovou výztuhou.....	63
5.4.	Závěr analýzy rámového rohu	66
a)	Elastický materiál.....	66
b)	Pružno – plastický materiál.....	67
6.	Analýza příhradového svařovaného N styčníku.....	70
6.1.	Tvorba numerického modelu N styčníku	71
6.2.	Výpočet únosnosti prvků dle normových vztahů	73
a)	Podmínky pro posouzení mezipásového prutu	73
b)	Plastifikace stěny pásu	73
c)	Porušení mezipásového prutu	74
d)	Smyk pásu.....	74
6.3.	Výsledky analýzy N styčníku s jednou výztuhou.....	75
a)	Model 1 – Výsledky N styčníku s příhradovou konstrukcí	76
b)	Model 2 – Výsledky samostatného N styčníku se dvěma silami.....	80
6.3.1.	Vyhodnocení a srovnání výsledků	84
a)	Srovnání výsledků s programem Ansys.....	88
6.4.	Výsledky analýzy N styčníku se dvěma výztuhami	89
a)	Model 1 – Výsledky N styčníku v příhradové konstrukci	90

DIPLOMOVÁ PRÁCE

b)	Model 2 – Výsledky samostatného N styčnicku.....	93
6.4.1.	Vyhodnocení a srovnání výsledků	97
b)	Srovnání výsledků s programem Ansys.....	100
6.5.	Výsledky analýzy N styčnicku s jednou výztuhou se změnou pozice	101
a)	Model 1 – Výsledky N styčnicku v příhradové konstrukci	102
b)	Model 2 – Výsledky samostatného N styčnicku.....	106
6.5.1.	Vyhodnocení a srovnání výsledků	109
6.6.	Závěr analýzy příhradového N styčnicku.....	111
7.	Posouzení rámového rohu zimního stadionu v Opavě	112
7.1.	Tvorba numerického modelu rámového rohu	113
7.2.	Zatížení rámového rohu.....	114
a)	Stálé zatížení od konstrukce střechy	114
b)	Zatížení sněhem	114
c)	Zatížení větrem - Příčle.....	114
d)	Zatížení větrem – Sloup	115
e)	Reakce od okapové vaznice	115
7.3.	Výsledky posouzení rámového rohu	115
a)	Výsledky pro ideálně pružno-plastický materiál	116
b)	Výsledky pro pružno-plastický materiál se zpevněním	119
7.4.	Závěr posouzení rámového rohu	122
8.	Závěr diplomové práce.....	124
	Seznam použité literatury:.....	127
	Seznam obrázků:	128
	Seznam tabulek:	131
	Seznam grafů:.....	133
	Použitý software:.....	135

1. Úvod

Cílem této práce je analýza ocelových styčníků analytickou metodou dle ČSN EN 1993-1-8 a následné porovnání výsledků s lineárními a nelineárními modely vytvořenými pomocí metody konečných prvků softwarem Scia Engineer. Dále specifikovat tvorbu výpočetních modelů, jejich pravidla, postupy pro dosažení výsledků, které budou srovnatelné s ručními výpočty.

2. Klasifikace styčníků

Dle ČSN EN 1993-1-8: *Navrhování ocelových konstrukcí – Navrhování styčníků*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

2.1. Klasifikace styčníků podle tuhosti

Styčníky ocelových konstrukcí lze klasifikovat do tří tříd dle rotační tuhosti a to jako tuhý, polotuhý a kloubový. Každý styčník má počáteční tuhost $S_{j,ini}$ s klasifikační hranicí.

a) Kloubové styčníky

Kloubový styčník má být schopen přenášet vnitřní síly, aniž by se vytvářely významné ohybové momenty, které by mohly nepříznivě ovlivňovat pruty nebo konstrukci jako celek.

Kloubový styčník má umožnit natočení od návrhového zatížení.

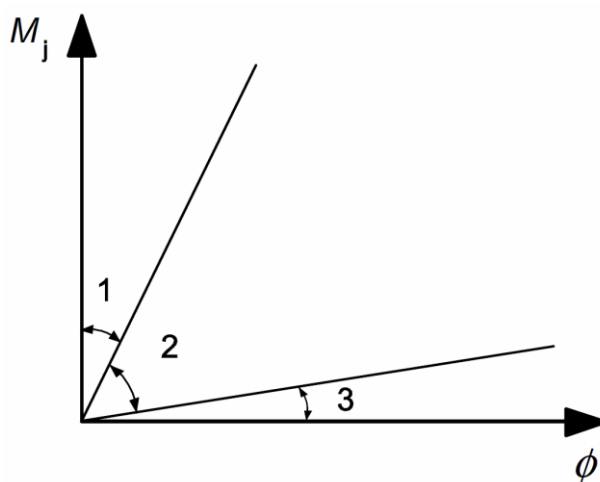
b) Tuhé styčníky

U tuhých styčníků lze předpokládat, že mají dostatečnou rotační tuhost, která při analýze umožňuje využít plné spojitosti.

c) Polotuhé styčníky

Styčník, který nesplňuje podmínky pro tuhý ani kloubový styčník, se klasifikuje jako polotuhý.

d) Klasifikační hranice



Obrázek 1 - Graf pro klasifikaci styčníků dle tuhosti

Oblast 1: Tuhé styčníky

$$S_{j,ini} \geq k_b \frac{EI_b}{L_b} \quad (2.1)$$

kde

$k_b = 8$ pro prutové konstrukce, kde ztužení omezuje vodorovné deformace na nejméně 80%

$k_b = 25$ pro ostatní prutové konstrukce, za předpokladu, že v každém patře platí $K_b/K_c \geq 1$

Oblast 2: Polotuhé styčníky

Oblast 3: Kloubové styčníky

$$S_{j,ini} \leq 0,5 \frac{EI_b}{L_b} \quad (2.2)$$

Pro prutové konstrukce s $K_b/K_c < 1$ se mají styčníky klasifikovat jako polotuhé

kde

K_b je střední hodnota I_b/L_b pro všechny nosníky nad uvažovaným podlažím;

K_c střední hodnota I_c/L_c pro všechny sloupy nad uvažovaným podlažím;

I_b moment setrvačnosti nosníku;

I_c moment setrvačnosti sloupu;

L_b rozpětí nosníku (mezi středy sloupů);

L_c výška podlaží (sloupu).

2.2. Klasifikace styčníků podle únosnosti

Dle ČSN EN 1993-1-8: *Navrhování ocelových konstrukcí – Navrhování styčníků*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.

Styčnick lze klasifikovat jako styčnick s plnou únosností, kloubový nebo styčnick s částečnou únosností porovnáním jeho návrhové únosnosti $M_{j,Rd}$ s návrhovou únosností prutu, který připojuje. Při klasifikaci styčníků se má uvažovat návrhová únosnost prutu, který je do styčnicku připojen.

a) Kloubové styčnický

Kloubový styčnick má být schopen přenášet vnitřní síly, aniž by se vytvářely významné ohybové momenty, které by mohly nepříznivě ovlivňovat pruty nebo konstrukci jako celek.

Kloubový styčnick má umožnit natočení od návrhového zatížení.

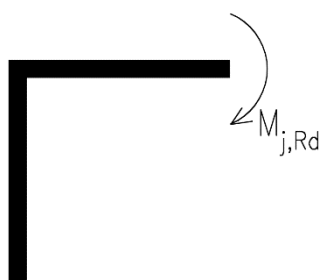
Pokud má styčnick dostatečnou rotační kapacitu, lze jej klasifikovat jako kloubový, jestliže jeho návrhová momentová únosnost $M_{j,Rd}$ nebude větší než 0,25 násobek návrhové momentové únosnosti požadované pro styčnick s plnou únosností.

b) Styčnický s plnou únosností

Návrhová únosnost styčnicku s plnou únosností nemá být menší než návrhová únosnost připojovaného prutu.

Podmínky pro klasifikaci styčnicku s plnou únosností:

Vrchní část sloupu:

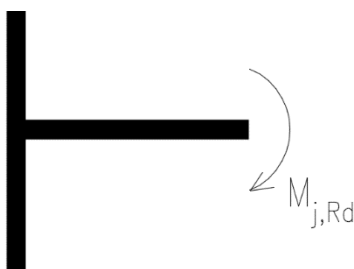


bud'

$$M_{j,Rd} \geq M_{b,pl.Rd}$$

nebo

$$M_{j,Rd} \geq M_{c,pl.Rd}$$



bud'

$$M_{j,Rd} \geq M_{b,pl.Rd}$$

nebo

$$M_{j,Rd} \geq 2M_{c,pl.Rd}$$

kde:

$M_{b,pl,Rd}$ je návrhová plastická momentová únosnost nosníku;

$M_{c,pl,Rd}$ je návrhová plastická momentová únosnost sloupu.

3. Analýza styčnicku

Analýza je sepsána dle [1], [6].

Obecně je potřeba uvážit vliv chování styčnicků na rozložení vnitřních sil a ohybových momentů v konstrukci a na celkovou deformaci konstrukce. Tento vliv lze zanedbat, pokud jsou zmíněné vlivy dostatečně malé.

U kloubového styčnicku se předpokládá, že styčník nepřenáší ohybový moment.

U tuhého styčnicku se předpokládá, že nemá vliv na analýzu konstrukce.

Pro polotuhý styčník je dáno, že se s ním musí při analýze uvažovat.

Použitím globální analýzy a klasifikace styčnicku se docílí vhodného určení modelu styčnicku dle tabulky.

Tabulka 1 - Klasifikace a modely styčnicků

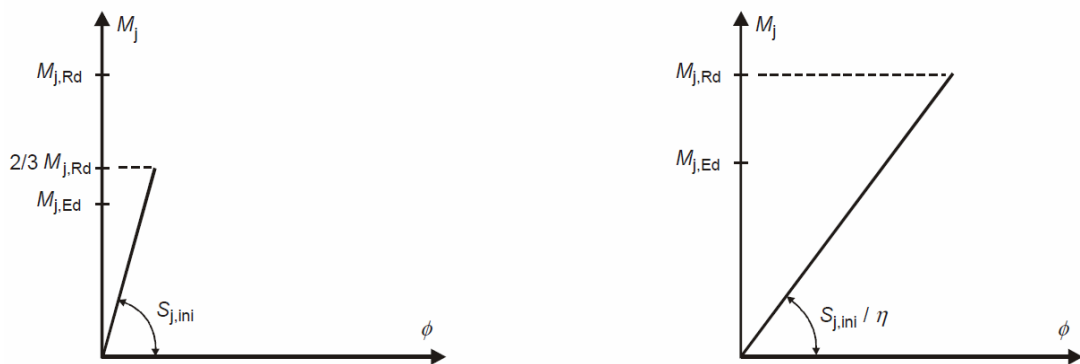
Metoda globální analýzy	Klasifikace styčnicků		
Pružná	Kloubový	Tuhý	Polotuhý
Tuho-plastická	Kloubový	S plnou únosností	S částečnou únosností
Pružné-plastická	Kloubový	Tuhý s plnou únosností	Polotuhý s částečnou únosností Polotuhý s plnou únosností Tuhý s částečnou únosností
Typ modelu styčnicku	Kloubový	Spojité	Částečně spojitý

3.1. Pružná globální analýza

Styčník, na který působí vnitřní síly jako výsledek analýzy musí mít dostatečnou únosnost.

Pro polotuhé styčníky se má v globální analýze obecně uvažovat s rotační tuhostí S_j , která odpovídá ohybovému momentu $M_{j,Ed}$. Jestliže $M_{j,Ed}$ nepřevyšuje $2/3 M_{j,Ed}$, lze v globální analýze uvažovat s počáteční tuhostí $S_{j,ini}$, viz obrázek.

Pro zjednodušení, lze pro všechny hodnoty momentu $M_{j,Ed}$ uvažovat rotační tuhost jako $S_{j,ini}/\eta$.



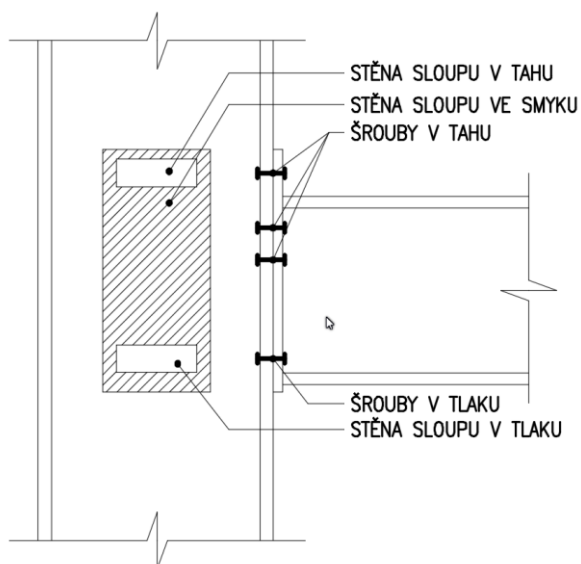
Obrázek 2 - Rotační tuhost pro pružnou globální analýzu, a) pro $M_{j,Rd} \leq 2/3 M_{j,Rd}$; b) pro $M_{j,Rd} \leq M_{j,Rd}$

Tabulka 2 - Součinitel změny tuhosti η

Typ spoje	Styčník nosníku se sloupem	Jiné typy styčníků (přípoj nosníku na průvlak, spoj nosníků, kotvení sloupů)
Svařovaný	2,0	3,0
Šroubovaný s čelní deskou	2,0	3,0
Šroubovaný s úhelníky na pásnicích	2,0	3,5
Patní desky	-	3,0

4. Metoda komponent

Principem metody komponent je rozdělení styčníků na jednotlivé komponenty podle jejich namáhání viz obr. 1. Typy namáhání budou podrobněji popsány v následujících kapitolách. Dle [1] a [6].



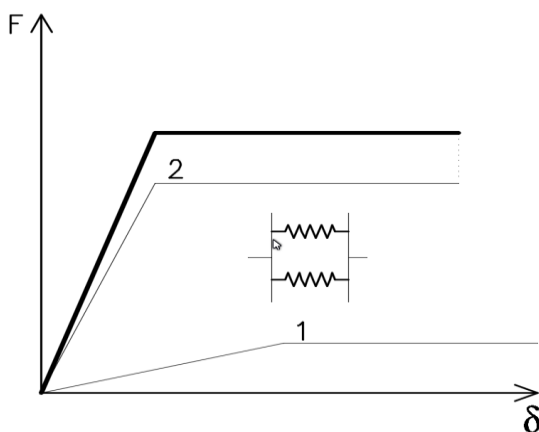
Obrázek 3 - Princip použití metody komponent na jednostranném styčníku

Každou komponentu lze obecně popsat v pracovním diagramu v závislosti působící síly F a deformace δ . Následně je možné z pracovních diagramů jednotlivých komponent složit pracovní diagram styčníku. Působení daných komponent se rozlišuje na paralelní a sériové, což je podstatné pro skládání komponentů. Paralelní působení komponentů:

$$F_u = F_{1,u} + F_{2,u} \quad (4.1)$$

$$k = k_1 + k_2 \quad (4.2)$$

$$\delta = \min(\delta_1; \delta_2) \quad (4.3)$$



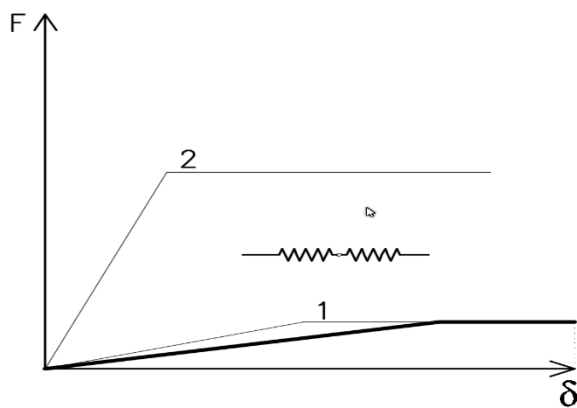
Obrázek 4 - Paralelní zapojení komponentů

Sériové zapojení:

$$F_u = \min(F_{1,u}; F_{2,u}) \quad (4.4)$$

$$1/k = 1/k_1 + 1/k_2 \quad (4.5)$$

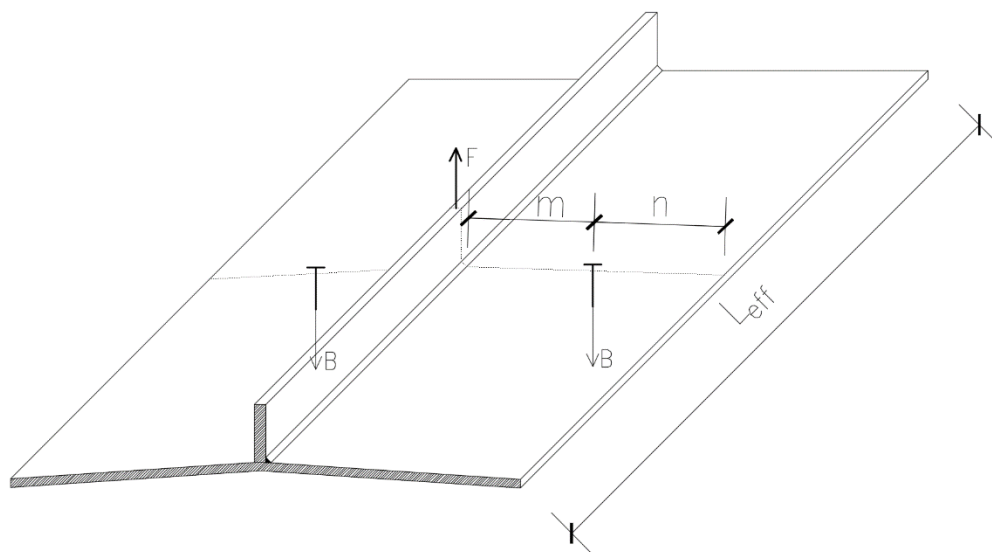
$$\delta = \delta_1 + \delta_2 \quad (4.6)$$



Obrázek 5 - Sériové zapojení komponentů

4.1. Náhradní T profil

Při výpočtu únosnosti pásnice sloupu nebo čelní desky v ohybu se používá náhradní T profil s jednou řadou šroubů. Důležitým prvkem pro výpočet únosnosti náhradního T profilu je jeho délka, která vyjadřuje způsob porušení T profilu.



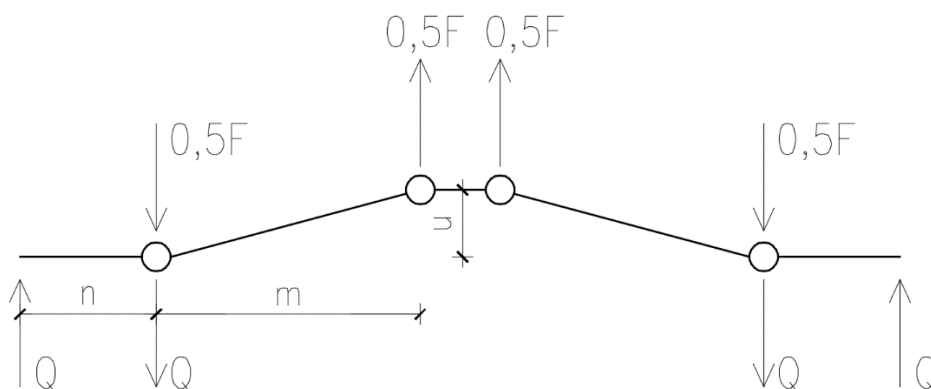
Obrázek 6 - Náhradní T profil

Typy porušení náhradního T profilu

Při tuhoplastické analýze T profilu se předpokládají čtyři typy porušení náhradního T profilu a to vytvořením plastických kloubů nebo porušením šroubů.

i. Porušení se čtyřmi plastickými klouby

Prvním případem porušení je vznik čtyř plastických kloubů. V tomto případě nedochází k porušení šroubů, síly vzniklé v tomto modelu jsou od páčení šroubů.



Obrázek 7 - Model porušení se čtyřmi plastickými klouby

$$\tan \varphi \cong \varphi = \frac{u}{m} \quad (4.7)$$

$$M_{pl} = W_{pl} \cdot f_y = \frac{0,25 \cdot L_{eff} \cdot t^2 \cdot f_y}{\gamma_{M0}} \quad (4.8)$$

Z momentové podmínky rovnováhy lze sestavit rovnici:

$$2 \frac{F}{2} 0 + 4Q0 + 2 \left(\frac{F}{2} u \right) = 4\varphi M_{pl} \quad (4.9)$$

následně lze dosadit vztah:

$$u = m\varphi$$

Z principu zachování energie, lze vyjádřit návrhovou sílu na mezi porušení porovnáním vnější práce (síla násobena dráhou) s prací vnitřní (moment násobený natočením).

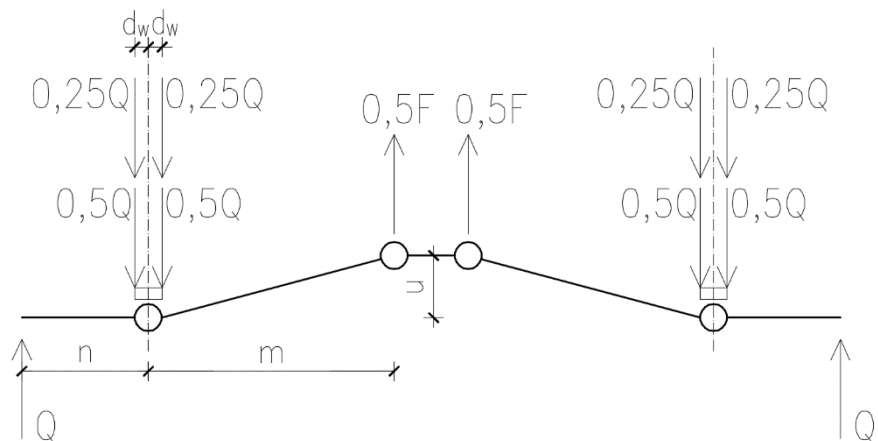
$$Fm\varphi = 4\varphi M_{pl} \quad (4.9)$$

Z toho vztahu lze odvodit únosnost náhradního T profilu:

$$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m} \quad (4.10)$$

ii. Porušení se čtyřmi plastickými klouby se zahrnutím matice či hlavy šroubu

Pro přesnější výpočet únosnosti náhradního T profilu, lze do výpočtu zahrnout skutečnou velikost podložky nebo matice či hlavy šroubu pro šroub bez podložky. Je zaveden předpoklad, že síly působí na hranách podložky.



Obrázek 8 - Model porušení se čtyřmi plastickými klouby s podložkou

Z principu virtuálních prací lze vyjádřit:

$$\left[F_m - 2 \left(\frac{F}{4} + \frac{Q}{2} \right) d_w \right] \varphi = 4 \varphi M_{pl} \quad (4.11)$$

Podmíněk rovnováhy

$$F + 2Q = 4 \left(\frac{F}{4} + \frac{Q}{2} \right) \quad (4.12)$$

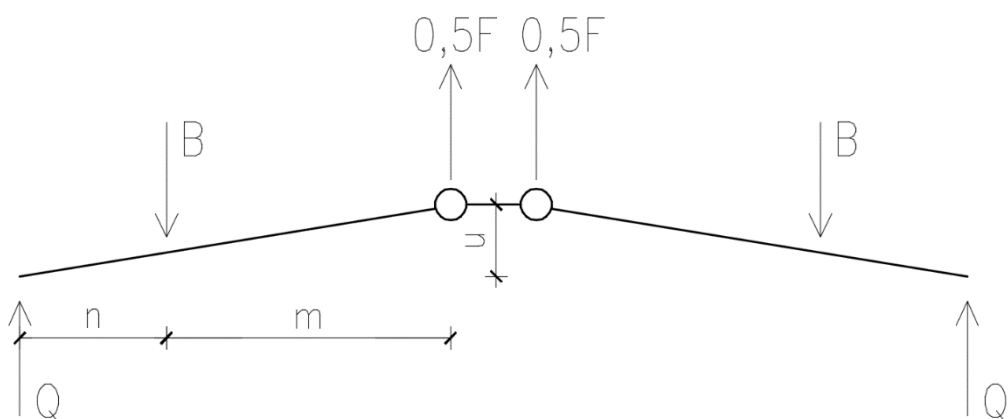
$$Q_n + \left(\frac{F}{4} + \frac{Q}{2} \right) d_q = M_{pl} \quad (4.13)$$

lze vyjádřit návrhovou sílu pro porušení náhradního T profilu s uvažáním podložek a hlavy šroubu:

$$F = \frac{(8n - 2d_w)M_{pl}}{2mn - d_w(m + n)} \quad (4.14)$$

a) Porušení s dvěma plastickými klouby

Další typ porušení náhradního T profilu, kde je předpokládáno napětí ve šroubech na mezi plasticity.



Obrázek 9 - Model porušení se dvěma plastickými klouby

$$\tan \varphi \cong \frac{u}{m+n} = \frac{v}{n} = \varphi \quad (4.15)$$

podmínka rovnováhy:

$$2 \frac{F}{2} u - 2Bc + Q0 = 2\varphi M_{pl} \quad (4.16)$$

dosazením

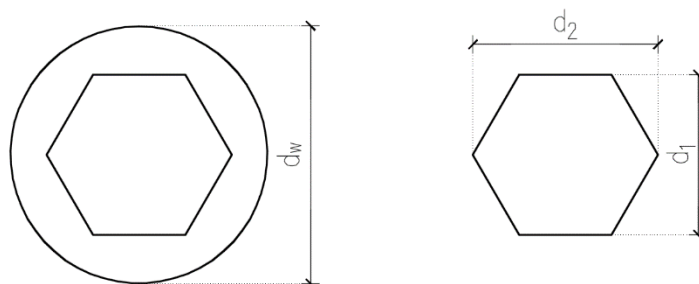
$$u = \varphi(m+n) \quad (4.17)$$

Do podmínky rovnováhy lze vyjádřit výpočet únosnosti:

$$F = \frac{2M_{pl} + 2B_n}{m+n} \quad (4.18)$$

b) Porušení šroubů

K porušení šroubů dochází tahovým namáháním nebo protlačením hlavy nebo matice šroubu.



Obrázek 10 - Rozměry matice a šroubu

určení rozměru d_w

$$d_w = \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (4.19)$$

výpočet únosnosti šroubu z minima únosnosti v tahu či protlačení hlavy šroubu nebo matice:

$$2F_{t,Rd} = 2 \min \left\{ \frac{0,9A_s f_{ub}}{Y_{M2}}, \frac{0,6\pi d_w t f_u}{Y_{M2}} \right\} \quad (4.20)$$

4.2. Shrnutí porušení náhradního T profilu

Z výše uvedeného je patrné, že porušení daných šroubů v tahu a čelní desky v příčném ohybu se uvažuje na náhradním T profilu. Určí se tedy jako:

$$F_{T,Rd} = \min(F_{T,1,Rd}; F_{T,2,Rd}; F_{T,2,Rd}) \quad (4.21)$$

Tabulka 3 - Shrnutí porušení

Způsob porušení náhradního T profilu		Návrhová únosnost
Porušení 1	4 plastické klouby	$F_{T,1,Rd} = \frac{4M_{pl,1,Rd}}{m}$
Porušení 1a	4 plastické klouby s uvážením velikosti podložky a hlavy šroubu	$F = \frac{(8n - 2d_w)M_{pl}}{2mn - d_w(m + n)}$
Porušení 2	2 plastické klouby	$F = \frac{2M_{pl} + 2B_n}{m + n}$
Porušení 3	Porušení šroubu v tahu nebo protlačení	$2F_{t,Rd} = 2\min \left\{ \frac{0,9A_s f_{ub}}{Y_{M2}}, \frac{0,6\pi d_w t f_u}{Y_{M2}} \right\}$

4.3. Účinná délka náhradního T profilu

Účinná délka, která je využita při výpočtu návrhového ohybového momentu u jednotlivých metod porušení se určuje pro jednotlivé řady šroubů metodou liniových kloubů. Pro každou řadu šroubů je možný vznik různých typů porušení náhradního T profilu, proto se vždy uvažuje nejmenší ze všech hodnot.

$$L_{eff,1} = \min(L_{eff,cp}; L_{eff,op}) \quad (4.22)$$

$$L_{eff,2} = L_{eff,op} \quad (4.23)$$

Účinná délka se pro každý typ porušení určí pomocí virtuálních prací. Virtuální práce vnějších sil na kruhové desce lze vyjádřit:

$$V_e = F\delta \quad (4.24)$$

práce vnitřních sil je složena z práce vnitřních sil na plášti kužele a z práce při natočení po obvodě kruhu:

$$V_i = V_{i,k} + V_{i,o} \quad (4.25)$$

virtuální práce po obvodě kruhu $2\pi r$:

$$V_{i,o} = 2\pi r M^l \varphi \quad (4.26)$$

kde je plastický moment uvažován na jednotku délky $M^l = 0,25t^2 f_y$ a natočení

$$\varphi = \frac{\delta}{r} \quad (4.27)$$

Virtuální práce vnitřních ohybových momentů na plášti vychází z práce na jedné lomové linii jehlanu:

$$\Delta V_{i,k} = r M^l 2\alpha \quad (4.28)$$

na lomové linii jehlanu dochází k vzájemnému natočení dvou trojúhelníkových segmentů o úhel 2α .

$$\Delta V_{i,k} = rM^l 2\alpha \tan^{-1} \frac{\delta}{r} \tan \frac{\Delta\varphi}{2} \quad (4.29)$$

pro malý úhel platí: $\tan \frac{d\varphi}{2} = \frac{d\varphi}{2}$

$$dV_{i,k} = rM^l 2 \tan \frac{\delta d\varphi}{2r} \quad (4.30)$$

integrace po obvodu:

$$V_i = \int_0^{2\pi} dV_{i,k} = M^l \delta 2\pi \quad (4.31)$$

potom lze dosadit do práce vnitřních sil

$$V_i = 2\pi M^l \delta + 2\pi r M^l \frac{\delta}{r} = 4\pi M^l \delta \quad (4.32)$$

Virtuální práce vnitřních sil kužele a poloviny náhradního T profilu si musí být rovny:

$$M^l \frac{\delta}{r} L_{eff,2} 2 = 4\pi M^l \delta \quad (4.33)$$

po úpravě lze vyjádřit plastické kruhové porušení desky:

$$L_{eff} = 2\pi r \quad (4.34)$$

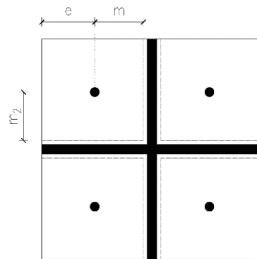
Využitím virtuálních prací lze vyjádřit jednotlivé typy porušení a tím získat účinné délky pro jednotlivé typy porušení.

V případě, že v blízkosti šroubů se nachází výztuha pásnice sloupu se určí porušení šroubu samostatně:

$$L_{eff,op} = \alpha m \quad (4.35)$$

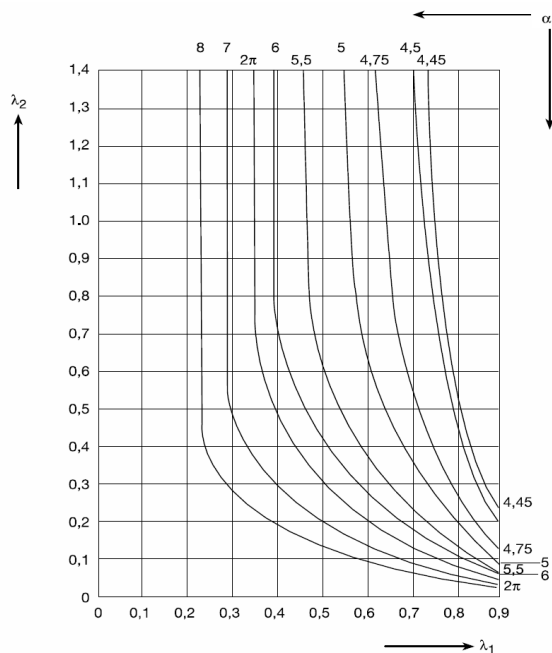
Kde součinitel α se stanoví z grafu, který byl zpracován jako souhrn analytických a numerických řešení při posouvání šroubu reálného rozměru v rohu. Pro zjištění součinitelů α bylo použito metody liniových koubů. Namísto využití algoritmizace pro zjištění součinitele α je možné využití grafu, který je závislý na parametrech:

$$\lambda_1 = \frac{m}{m+e}; \lambda_2 = \frac{m_2}{m+e} \quad (4.36)$$



Obrázek 11 - Rozměry pro parametr λ

DIPLOMOVÁ PRÁCE



Obrázek 12 - Graf pro stanovení účinné délky náhradního T profilu pro šrouby u výztuhy

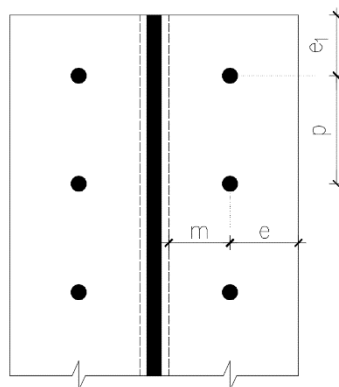
Jelikož může pro každou řadu šroubů nastat více způsobů porušení, všechny typy a vztahy pro účinné délky budou uvedeny v následujících tabulkách.

Tabulka 4 - Účinné délky nevyztužené pásnice sloupu

Poloha řady šroubů	Řada šroubů uvažovaná samostatně		Řada šroubů uvažovaná jako součást skupiny řad šroubů	
	Kruhové porušení $\ell_{eff,cp}$	Nekruhové porušení $\ell_{eff,nc}$	Kruhové porušení $\ell_{eff,cp}$	Nekruhové porušení $\ell_{eff,nc}$
Vnitřní řada šroubů	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Koncová řada šroubů	menší z: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	menší z: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	menší z: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	menší z: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
1. způsob	$\ell_{eff,1} = \ell_{eff,nc}$ ale $\ell_{eff,1} \leq \ell_{eff,cp}$		$\Sigma \ell_{eff,1} = \Sigma \ell_{eff,nc}$ ale $\Sigma \ell_{eff,1} \leq \Sigma \ell_{eff,cp}$	
2. způsob	$\ell_{eff,2} = \ell_{eff,nc}$		$\Sigma \ell_{eff,2} = \Sigma \ell_{eff,nc}$	

e_1 je vzdálenost středu poslední řady spojovacích prostředků k volnému konci pásnice (viz řada 1 a řada 2 na obrázku 6.9)

* Převzato z [6]



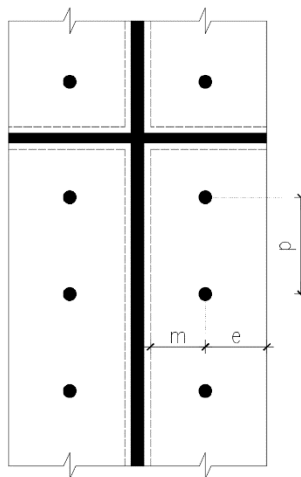
Obrázek 13 - Vzdálenost nevyztužené pásnice sloupu

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 5 - Účinné délky vyztužené pásnice sloupu

Poloha řady šroubů	Řada šroubů uvažovaná samostatně		Řada šroubů uvažovaná jako součást skupiny řad šroubů	
	Kruhové porušení $\ell_{\text{eff,cp}}$	Nekruhové porušení $\ell_{\text{eff,nc}}$	Kruhové porušení $\ell_{\text{eff,cp}}$	Nekruhové porušení $\ell_{\text{eff,nc}}$
Řada šroubů sousedící s výztuhou	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Jiná vnitřní řada šroubů	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Jiná koncová řada šroubů	menší z: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	menší z: $4m + 1,25e$ $2m + 0,625e + e_1$	menší z: $\pi m + p$ $2e_1 + p$	menší z: $2m + 0,625e + 0,5p$ $e_1 + 0,5p$
Koncová řada šroubů sousedící s výztuhou	menší z: $2\pi m$ $\pi m + 2e_1$	$e_1 + \alpha m - (2m + 0,625e)$	netýká se	netýká se
1. způsob	$\ell_{\text{eff},1} = \ell_{\text{eff,nc}}$ ale $\ell_{\text{eff},1} \leq \ell_{\text{eff,cp}}$		$\Sigma \ell_{\text{eff},1} = \Sigma \ell_{\text{eff,nc}}$ ale $\Sigma \ell_{\text{eff},1} \leq \Sigma \ell_{\text{eff,cp}}$	
2. způsob	$\ell_{\text{eff},2} = \ell_{\text{eff,nc}}$		$\Sigma \ell_{\text{eff},2} = \Sigma \ell_{\text{eff,nc}}$	

* Hodnoty součinitele α se získají z grafu viz Obrázek 12.

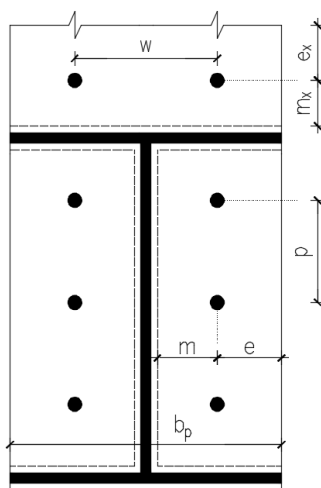


Obrázek 14 - Vzdálenost vyztužení pásnice sloupu

Tabulka 6 - Účinné délky pro čelní desku

Poloha řady šroubů	Řada šroubů uvažovaná samostatně		Řada šroubů uvažovaná jako součást skupiny řad šroubů	
	Kruhové porušení $\ell_{\text{eff,cp}}$	Nekruhové porušení $\ell_{\text{eff,nc}}$	Kruhové porušení $\ell_{\text{eff,cp}}$	Nekruhové porušení $\ell_{\text{eff,nc}}$
Řada šroubů vně tažené pásnice nosníku	nejmenší z: $2\pi m_x$ $\pi m_x + w$ $\pi m_x + 2e$	nejmenší z: $4m_x + 1,25e_x$ $e + 2m_x + 0,625e_x$ $0,5b_p$ $0,5w + 2m_x + 0,625e_x$	—	—
Řada šroubů pod taženou pásnicí nosníku	$2\pi m$	αm	$\pi m + p$	$0,5p + \alpha m - (2m + 0,625e)$
Vnitřní řada šroubů	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$2p$	p
Koncová řada šroubů	$2\pi m$	$4m + 1,25e$	$\pi m + p$	$2m + 0,625e + 0,5p$
1. způsob	$\ell_{\text{eff},1} = \ell_{\text{eff,nc}}$ ale $\ell_{\text{eff},1} \leq \ell_{\text{eff,cp}}$		$\Sigma \ell_{\text{eff},1} = \Sigma \ell_{\text{eff,nc}}$ ale $\Sigma \ell_{\text{eff},1} \leq \Sigma \ell_{\text{eff,cp}}$	
2. způsob	$\ell_{\text{eff},2} = \ell_{\text{eff,nc}}$		$\Sigma \ell_{\text{eff},2} = \Sigma \ell_{\text{eff,nc}}$	

* Dle [6]



Obrázek 15 - Vzdálenost čelní desky nosníku

4.4. Příspěvek příložky k únosnosti

Pokud bude použita příložka k vyztužení pásnice zvyšuje se únosnost náhradního T profilu v tahu ohybem příložky pro první způsob porušení (4 plastické klouby) o ohybovou únosnost příložky.

$$F_{T,Rd} = \frac{4M_{pl,Rd} + 2M_{bp,Rd}}{m} \quad (4.37)$$

Plastický moment únosnosti příložky se spočte ze vztahu:

$$M_{bp,Rd} = \frac{0,25 \sum L_{eff} t_{bp}^2 f_{y,bp}}{\gamma_{M0}} \quad (4.38)$$

kde t_{bp} je tloušťka příložky.

4.5. Stěna sloupu ve smyku

Výpočetní postupy pro stěnu sloupu ve smyku, které budou níže uvedeny, platí pro štíhlostní podmínku $d/t_w \leq 69\varepsilon$.

Pokud je posuzovaný styčník jednostranný, nebo oboustranný s podobnou výškou, je výpočet pro návrhovou smykovou sílu pro nevyztuženou stěnu dán vztahem:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9 f_{y,wc} A_{vc}}{\sqrt{3} \gamma_{M0}} \quad (4.39)$$

V případě, že je stěna sloupu vyztužena vodorovnými výztuhami, lze návrhovou únosnost panelu stěny ve smyku zvýšit o působení uzavřeného rámu tvořeného pásnicemi sloupu a výztuhami.

$$V_{wp,Rd} = \frac{4M_{pl,fc,Rd}}{d_s} \quad (4.40)$$

ale zároveň musí platit:

$$V_{wp,Rd} \leq \frac{2M_{pl,fc,Rd} + 2M_{pl,st,Rd}}{d_s} \quad (4.41)$$

kde

d_s je osová vzdálenost výztuh;

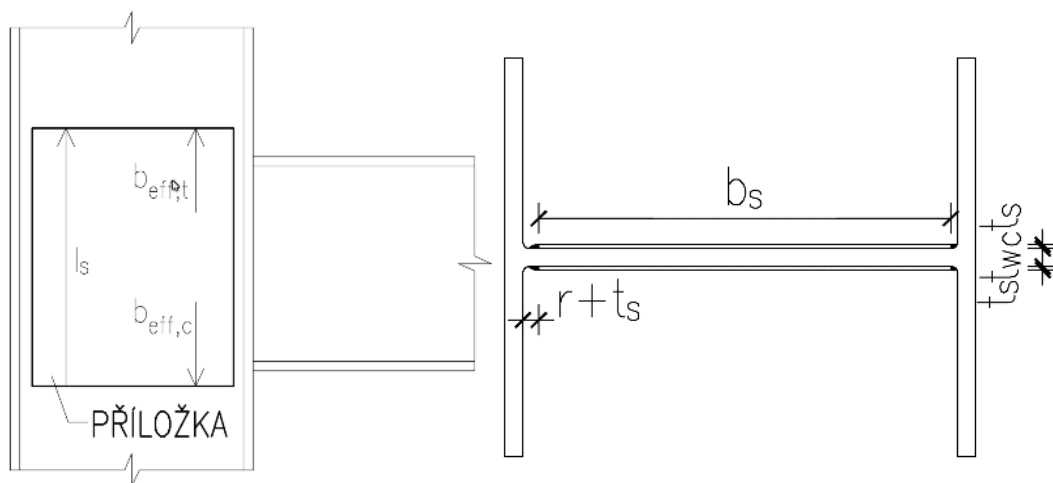
$M_{pl,fc,Rd}$ návrhová plastická únosnost pásnice sloupu;

$M_{pl,st,Rd}$ návrhová plastická únosnost výztuhy.

Pokud je stěna sloupu vyztužena příložkou, je možno původní smykovou plochu A_{vc} navýšit o $b_s t_{wc}$. Toto navýšení platí pouze pro jednostrannou příložku, pokud jsou na stěnu příložky použity příložky dvě, bude příspěvek příložky započítán pouze jednou.

Dále je dána podmínka, že průměrná smyková síla působící ve sloupu, musí být menší, než únosnost stěny sloupu ve smyku, dle vztahu:

$$V_{wp,Ed} = \frac{M_{b1,Ed} - M_{b2,Ed}}{z} - \frac{V_{c1,Ed} - V_{c2,Ed}}{2} \quad (4.42)$$



Obrázek 16 – Rozměry pro příložky stěny sloupu ve smyku

Pro zahrnutí nerovnováhy ohybových momentů z hlediska uspořádání nosného prvku ke sloupu, je použit převodní součinitel β .

Tabulka 7 - Hodnoty převodního součinitele β

Uspořádání styčníků		Zatížení	Hodnota β
		$M_{b1,Ed}$	$\beta \approx 1$
		$M_{b1,Ed} = M_{b2,Ed}$	$\beta = 0$ *)
		$M_{b1,Ed}/M_{b2,Ed} > 0$	$\beta \approx 1$
		$M_{b1,Ed}/M_{b2,Ed} < 0$	$\beta \approx 2$
		$M_{b1,Ed} + M_{b2,Ed} = 0$	$\beta \approx 2$

4.6. Stěna sloupu v tahu a tlaku

a) Stěna sloupu v příčném tahu

Vztah pro výpočet návrhové únosnosti nevyztužené stěny sloupu v příčném tahu:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M0}} \quad (4.43)$$

kde

ω je redukční součinitel, který zahrnuje vliv interakce se smykem a je závislý na převodním součiniteli β ;

$b_{eff,t,wc}$ účinná výška stěny sloupu v tahu

Tabulka 8 - Redukční součinitel ω

Převodní součinitel β	Redukční součinitel ω
$0 \leq \beta \leq 0,5$	$\omega = 1$
$0,5 < \beta < 1$	$\omega = \omega_1 + 2(1 - \beta)(1 - \omega_1)$
$\beta = 1$	$\omega = \omega_1$
$1 < \beta < 2$	$\omega = \omega_1 + (\beta - 1)(\omega_2 - \omega_1)$
$\beta = 2$	$\omega = \omega_2$
$\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 (b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$	$\omega_2 = \frac{1}{\sqrt{1 + 5,2 (b_{eff,c,wc} t_{wc} / A_{vc})^2}}$
A_{vc} je smyková plocha sloupu, viz 6.2.6.1; β převodní součinitel, viz 5.3(7).	

Pokud se jedná o svařovaný styčník, je nutno účinnou výšku sloupu stanovit vztahem:

$$b_{eff,t,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s) \quad (4.44)$$

Vzdálenost s je pro válcované průřezy sloupu I nebo H dána $s = r_c$, v případě, že se jedná o svařované průřezy stejného průřezu tak platí $s = \sqrt{2}a_b$.

Pokud posuzovaný styčník je šroubovaný, je účinná výška průřezu rovna účinné délce náhradního T profilu.

b) Stěna sloupu v příčném tlaku

Návrhová únosnost se vypočte ze vztahu:

$$F_{t,wc,Rd} = \frac{\omega k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{Y_{M0}} \quad (4.45)$$

ale zároveň musí platit:

$$F_{t,wc,Rd} \leq \frac{\omega \rho k_{wc} b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{Y_{M0}} \quad (4.46)$$

kde

k_{wc} je redukční součinitel zohledňující vliv normálového napětí

$$k_{wc} = 1,0 \quad \text{když} \quad \sigma_{com,Ed} \leq 0,7 f_{y,wc}$$

$$k_{wc} = 1,7 - \sigma_{com,Ed} / f_{y,wc} \quad \text{když} \quad \sigma_{com,Ed} > 0,7 f_{y,wc}$$

Hodnota $\sigma_{com,Ed}$, je uvažována jako největší tlakové napětí od osové síly a ohybového momentu.

Účinná výška pro svařovaný přípoj se vypočte ze vztahu:

$$b_{eff,t,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s)$$

pro šroubovaný přípoj:

$$b_{eff,t,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_b + 5(t_{fc} + s) + s_p \quad (4.47)$$

kde

s_p je délka získána rozkladem napětí čelní deskou pod úhlem 45°

Vzdálenost s je pro válcované průřezy sloupu I nebo H dána $s = r_c$, v případě, že se jedná o svařované průřezy stejného průřezu tak platí $s = \sqrt{2}a_b$.

Součinitel boulení stěny ρ je závislý na deskové štíhlosti a to:

$$\rho = 1,0 \quad \text{pro} \quad \bar{\lambda}_p \leq 0,72$$

$$\rho = (\bar{\lambda}_p - 0,2) / \bar{\lambda}_p^2 \quad \text{pro} \quad \bar{\lambda}_p > 0,72$$

4.7. Pásnice a stojina nosníku v tlaku a tahu**a) Pásnice a stojina nosníku v tlaku**

Návrhová únosnost pásnice a stojiny nosníku:

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{(h_b - t_{fb})} \quad (4.48)$$

kde

h_b je výška připojovaného nosníku;

t_{fb} tloušťka pásnice připojovaného nosníku;

$M_{c,Rd}$ únosnost nosníku v ohybu $M_{c,Rd} = W_{pl}f_y$.

b) Stěna nosníku v tahu

Únosnost stěny nosníku:

$$F_{t,wb,Rd} = \frac{b_{eff,t,wb} t_{wb} f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} \quad (4.49)$$

kde

$b_{eff,t,wb}$ je účinná výška stojiny rovna délce náhradního T profilu pro čelní desku v ohybu;

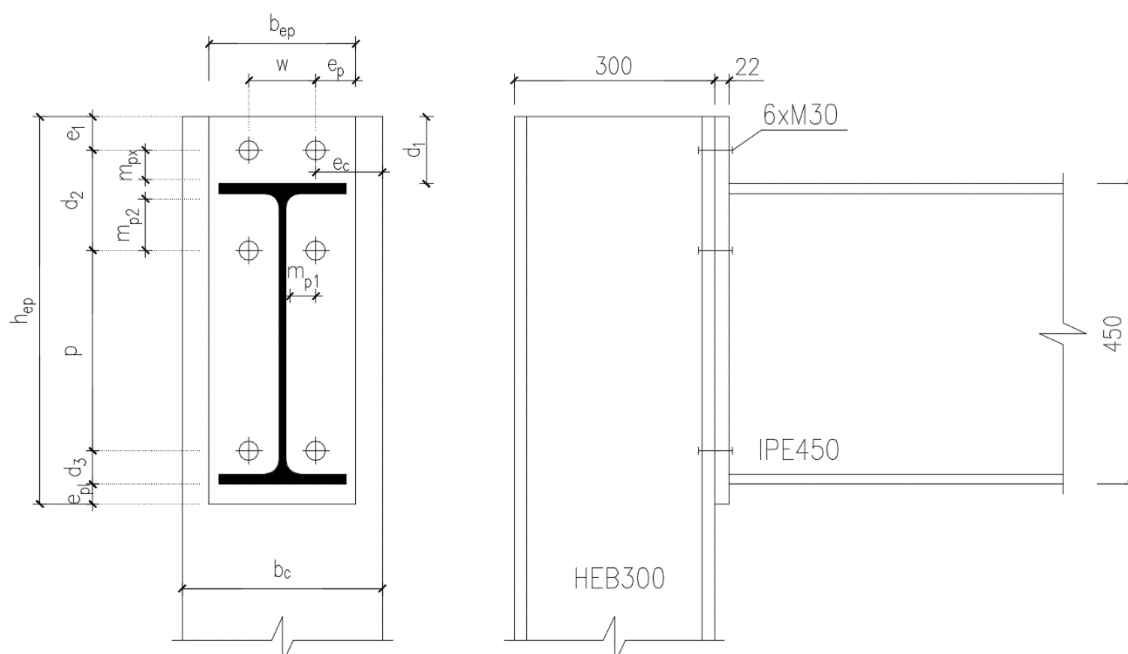
t_{wb} je tloušťka stěny připojovaného nosníku;

5. Analýza rámového rohu

V této části práce budou prezentovány výsledky ručního výpočtu za využití metody komponent v porovnání se skořepinovými modely v programu Scia Engineer. Celkem byly spočteny metodou komponent tři ocelové styčníky, které jsou vždy doplněny o výztužný prvek mezi pásnicemi sloupu. Těmito úpravami styčníku je následně sledováno schování skořepinového modelu jak za použití elastického materiálu, tak i materiálu pružno-plastického. Pro elastický materiál je hledána tuhost styčníku, pro srovnání s již zmiňovanou metodou komponent.

5.1. Výpočet rámového rohu metodou komponent

Řešený šroubovaný styčník je složen ze sloupu HEB300, příčle IPE450 a čelní desky o tl. 22 mm z oceli S235. Šrouby byly zvoleny M30, jakostní třídy 10.9. Pro následné zjištění deformace u_z , je použit ohybový moment $M = 100 \text{ kNm}$.



Obrázek 17 - Řešený rámový roh

a) Návrh svarů

Konzervativně je svar navržen na plnou únosnost.

$$a = t_{fb} \left(\frac{f_y}{\gamma_{M0}} \right) \left(\frac{\beta_w \gamma_{M2}}{f_u \sqrt{2}} \right)$$

proto lze tedy odvodit vztah pro příčli z dané oceli, konkrétně S235:

$$a \geq 0,46 t_{fb}$$

Svar tlačené pásnice příčle a čelní desky

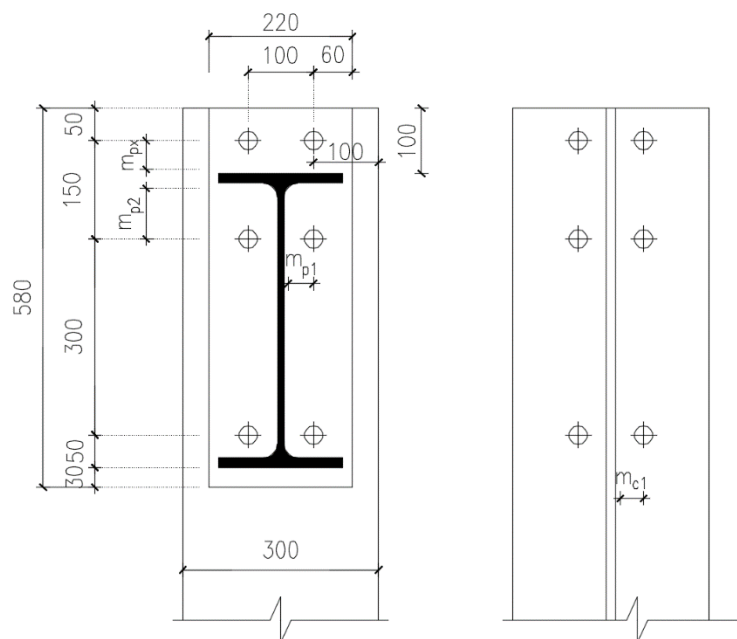
$$a \geq 0,46t_{fb} = 0,46 \cdot 14,6 = 6,72 \text{ mm} = 7 \text{ mm}$$

Svar stojiny příčle a čelní desky

Navrženo na plnou únosnost

$$a \geq 0,46t_{wb} = 0,46 \cdot 9,4 = 4,32 \text{ mm} = \mathbf{5 \text{ mm}}$$

b) Určení parametrů pro účinné délky



Obrázek 18 - Parametry pro účinné délky

$$m_{px} = (d_1 - e_1 - 0,8\sqrt{2} \cdot a_{tf}) = (100 - 50 - 0,8\sqrt{2} \cdot 7) = 42,1 \text{ mm}$$

$$m_{p1} = \frac{(w - t_{wb} - 2 \cdot 0,8\sqrt{2} \cdot a_w)}{2} = \frac{(100 - 9,4 - 2 \cdot 0,8\sqrt{2} \cdot 5)}{2} = 39,6 \text{ mm}$$

$$m_{p_2} = d_2 - (d_1 - e_1) - t_{fb} - 0,8\sqrt{2} \cdot a_{tf} = 150 - (100 - 50) - 14,6 - 0,8\sqrt{2} \cdot 7 = 77,5 \text{ mm}$$

$$m_{c1} = \frac{w - 0,8 \cdot 2r_c - t_{wc}}{2} = \frac{100 - 0,8 \cdot 2 \cdot 27 - 11}{2} = 22,9 \text{ mm}$$

c) Stojina nosníku v tahu

i. Únosnost 1. řady šroubů

Nevyztužená pásnice sloupu v příčném ohybu

$$2 \cdot \pi \cdot m_{c1} = 2 \cdot \pi \cdot 22,9 = 143,9 \text{ mm}$$

$$\pi \cdot m_{c1} + 2 \cdot e_1 = \pi \cdot 22,9 + 2 \cdot 50 = 171,9 \text{ mm}$$

$$4 + m_{c1} + 1,25 \cdot e_c = 4 \cdot 22,9 + 1,25 \cdot 100 = 216,6 \text{ mm}$$

$$2 \cdot m_{c1} + 0,625 \cdot e_c + e_1 = 2 \cdot 22,9 + 0,625 \cdot 100 + 50 = 158,3 \text{ mm}$$

DIPLOMOVÁ PRÁCE

$$\pi \cdot m_{c1} + 0,5 \cdot d_2 = \pi \cdot 22,9 + 0,5 \cdot 150 = 146,9 \text{ mm}$$

$$2 \cdot e_1 + 0,5 \cdot d_2 = 2 \cdot 50 + 0,5 \cdot 150 = 250 \text{ mm}$$

$$2 \cdot m_{c1} + 0,625 \cdot e_c + 0,5d_2 = 2 \cdot 22,9 + 0,625 \cdot 100 + 0,5 \cdot 150 = 183,3 \text{ mm}$$

$$e_1 + 0,5 \cdot d_2 = 50 + 0,5 \cdot 150 = 125 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1,c} = L_{eff,2,c} = 125 \text{ mm}$$

Únosnost jednoho šroubu v tahu

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 561 \cdot 1000}{1,25} \cdot 10^{-3} = 403,92 \text{ kN}$$

Únosnost pásnice dle způsobů porušení:

- 1. Způsob porušení

$$M_{pl,1,Rd,r1,c} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,c} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 125 \cdot 19^2 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6}$$

$$= 2,65 \text{ kNm}$$

$$F_{T,1,Rd,fc} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd,r1,c}}{m_{c1}} = \frac{4 \cdot 2,65}{22,9} \cdot 10^{-3} = 463,07 \text{ kN}$$

- 2. Způsob porušení

$$n = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(100; 60; 1,25 \cdot 22,9) = 28,63 \text{ mm}$$

$$M_{pl,2,Rd,r1,c} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,c} \cdot t_{tf}^2 \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 125 \cdot 19^2 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6}$$

$$= 2,65 \text{ kNm}$$

$$F_{T,2,Rd,fc} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd,r1,c} + n \sum F_{t,Rd}}{m_{c1} + n} = \frac{2 \cdot 2,65 + 28,63 \cdot 2 \cdot 403,92}{22,9 + 28,63}$$

$$= 551,71 \text{ kN}$$

- 3. Způsob porušení

$$F_{T,3,Rd,fc} = \sum F_{T,Rd} = 2 \cdot 403,92 = 807,84 \text{ kN}$$

$$F_{T,Rd,fc,row1} = \min(F_{T,1,Rd,fc}; F_{T,2,Rd,fc}; F_{T,3,Rd,fc}) = \min(463,07; 551,71; 807,84)$$

$$= 463,07 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 1

Čelní deska v příčném ohybu

$$2 \cdot \pi \cdot m_{px} = 2 \cdot \pi \cdot 42,1 = 264,4 \text{ mm}$$

$$\pi \cdot m_{px} + w = \pi \cdot 42,1 + 100 = 232,2 \text{ mm}$$

$$\pi \cdot m_{px} + 2 \cdot e_p = \pi \cdot 42,1 + 2 \cdot 60 = 252,2 \text{ mm}$$

$$4 \cdot m_{px} + 1,25 \cdot e_1 = 4 \cdot 42,1 + 1,25 \cdot 50 = 230,8 \text{ mm}$$

$$e_p + 2 \cdot m_{px} + 0,625 \cdot e_1 = 60 + 2 \cdot 42,1 + 0,625 \cdot 50 = 175,4 \text{ mm}$$

$$0,5 \cdot b_{ep} = 0,5 \cdot 220 = 110 \text{ mm}$$

$$0,5 \cdot w + 2 \cdot m_{px} + 0,625 \cdot e_1 = 0,5 \cdot 100 + 2 \cdot 42,1 + 0,625 \cdot 50 = 165,4 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = 110 \text{ mm}$$

Únosnost jednoho šroubu v tahu

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 561 \cdot 1000}{1,25} \cdot 10^{-3} = 403,92 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky dle způsobů porušení:

- 1. Způsob porušení

$$M_{pl,2,Rd,r1,c} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{yp}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 110 \cdot 22^2 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6}$$

$$= 3,13 \text{ kNm}$$

$$F_{T,1,Rd,ep} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd,r1,c}}{m_{c1}} = \frac{4 \cdot 3,13}{22,9} \cdot 10^{-3} = 297,32 \text{ kN}$$

- 2. Způsob porušení

$$n = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(50; 60; 1,25 \cdot 42,1) = 50 \text{ mm}$$

$$M_{pl,2,Rd,r1,c} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_p}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 110 \cdot 22^2 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6}$$

$$= 3,13 \text{ kNm}$$

$$F_{T,2,Rd,ep} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd,r1,c} + n \sum F_{t,Rd}}{m_{px} + n} = \frac{2 \cdot 3,13 + 50 \cdot 2 \cdot 403,92}{52,1 + 50}$$

$$= 506,6 \text{ kN}$$

- 3. Způsob porušení

$$F_{T,3,Rd,ep} = \sum F_{T,Rd} = 2 \cdot 403,92 = 807,84 \text{ kN}$$

DIPLOMOVÁ PRÁCE

$$F_{T,Rd,ep,row1} = \min(F_{T,1,Rd,ep}; F_{T,2,Rd,ep}; F_{T,3,Rd,ep}) = \min(297,32; 506,6; 807,84) \\ = 297,32 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 1

Stěna sloupu v příčném tahu

Převodní součinitel

$$\beta = 1 \quad \dots \quad \text{jednostranný styčník}$$

Účinná výška stěny je rovna účinné délce nevyztužení pásnice sloupu v příčném ohybu:

$$b_{eff,t,wc} = L_{eff,c} = 125 \text{ mm}$$

Smyková plocha sloupu:

$$A_{vc} = 4743 \text{ mm}^2$$

Redukční součinitel interakce se smykem:

$$\omega_{r1,c} = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{b_{eff,t,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{125 \cdot 11}{4743} \right)^2}} = 0,949$$

Návrhová únosnost nevyztužené stěny v příčném tahu:

$$F_{t,wc,Rd,row1} = \frac{\omega_{r1,c} b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,949 \cdot 125 \cdot 11 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-3} \\ = 306,80 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost 1. řady šroubů:

$$F_{t,Rd,row1} = \min(F_{T,Rd,fc,row1}; F_{T,Rd,ep,row1}; F_{t,wc,Rd,row1}) = \min(463,07; 297,32; 306,8) \\ = 297,32 \text{ kN}$$

Rozhoduje čelní deska v příčném ohybu

ii. Únosnost 2. řady šroubů

Nevyztužená pásnice sloupu v příčném ohybu

$$2 \cdot \pi \cdot m_{c1} = 2 \cdot \pi \cdot 22,9 = 143,9 \text{ mm}$$

$$4 \cdot m_{c1} + 1,25 \cdot e_c = 4 \cdot 22,9 + 2 \cdot 100 = 216,6 \text{ mm}$$

$$\pi \cdot m_{c1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 22,9 + 0,5 \cdot 300 = 221,9 \text{ mm}$$

$$\pi \cdot m_{c1} + 0,5 \cdot d_2 = \pi \cdot 22,9 + 0,5 \cdot 150 = 146,9 \text{ mm}$$

$$2 \cdot m_{c1} + 0,625 \cdot e_c + 0,5 \cdot p = 2 \cdot 22,9 + 0,625 \cdot 100 + 0,5 \cdot 300 = 258,3 \text{ mm}$$

$$2 \cdot m_{c1} + 0,625 \cdot e_c + 0,5 \cdot d_2 = 2 \cdot 22,9 + 0,625 \cdot 100 + 0,5 \cdot 150 = 183,3 \text{ mm}$$

$$0,5 \cdot p + 0,5 \cdot d_2 = 0,5 \cdot 300 + 0,5 \cdot 150 = 225 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1,c} = L_{eff,2,c} = 143,9 \text{ mm}$$

Únosnost jednoho šroubu v tahu

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 561 \cdot 1000}{1,25} \cdot 10^{-3} = 403,92 \text{ kN}$$

Únosnost pásnice dle způsobů porušení:

- 1. Způsob porušení

$$M_{pl,1,Rd,r1,c} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,c} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 143,9 \cdot 19^2 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6}$$

$$= 3,05 \text{ kNm}$$

$$F_{T,1,Rd,fc} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd,r1,c}}{m_{c1}} = \frac{4 \cdot 3,05}{22,9} \cdot 10^{-3} = 533,03 \text{ kN}$$

- 2. Způsob porušení

$$n = \min(e_{min}; 1,25m_{c1}) = \min(100; 60; 1,25 \cdot 22,9) = 28,63 \text{ mm}$$

$$M_{pl,2,Rd,r1,c} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,c} \cdot t_{fc}^2 \cdot f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 143,9 \cdot 19^2 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6}$$

$$= 3,05 \text{ kNm}$$

$$F_{T,2,Rd,fc} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd,r1,c} + n \sum F_{t,Rd}}{m_{c1} + n} = \frac{2 \cdot 3,05 + 28,63 \cdot 2 \cdot 403,92}{22,9 + 28,63}$$

$$= 567,25 \text{ kN}$$

- 3. Způsob porušení

$$F_{T,3,Rd,fc} = \sum F_{t,Rd} = 2 \cdot 403,92 = 807,84 \text{ kN}$$

$$F_{T,Rd,fc,row2} = \min(F_{T,1,Rd,fc}; F_{T,2,Rd,fc}; F_{T,3,Rd,fc}) = \min(533,03; 567,25; 807,84)$$

$$= 533,03 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 1

Čelní deska v příčném ohybu

$$2 \cdot \pi \cdot m_{p1} = 2 \cdot \pi \cdot 39,6 = 249,09 \text{ mm}$$

$$\pi \cdot m_{p1} + 0,5 \cdot p = \pi \cdot 39,6 + 0,5 \cdot 300 = 274,54 \text{ mm}$$

$$\lambda_{1,r2,b} = \frac{m_{p1}}{m_{p1} + e_p} = \frac{39,6}{39,6 + 60} = 0,4$$

$$\lambda_{1,r2,b} = \frac{m_{p2}}{m_{p1} + e_p} = \frac{77,5}{39,6 + 60} = 0,78$$

Z grafu odečteno z Obrázek 10:

$$\alpha_{r2,b} = 6,10$$

$$\alpha_{r2,b} \cdot m_{p1} = 6,10 \cdot 39,6 = 241,82 \text{ mm}$$

$$0,5 \cdot p + \alpha_{r2,b} \cdot m_{p1} - (2 \cdot m_{p1} + 0,625 \cdot e_p) = 0,5 \cdot 300 + 6,1 \cdot 39,6 - (2 \cdot 39,6 + 0,625 \cdot 60) = 275,04 \text{ mm}$$

$$L_{eff,1,b} = L_{eff,2,b} = 241,8 \text{ mm}$$

Únosnost jednoho šroubu v tahu

$$F_{t,Rd} = \frac{0,9 \cdot A_s \cdot f_{ub}}{\gamma_{M2}} = \frac{0,9 \cdot 561 \cdot 1000}{1,25} \cdot 10^{-3} = 403,92 \text{ kN}$$

Únosnost čelní desky dle způsobů porušení:

- 1. Způsob porušení

$$M_{pl,2,Rd,r1,c} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,1,b} \cdot t_p^2 \cdot f_{yp}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 241,8 \cdot 22^2 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6} = 6,88 \text{ kNm}$$

$$F_{T,1,Rd,ep} = \frac{4 \cdot M_{pl,1,Rd,r1,c}}{m_{p1}} = \frac{4 \cdot 6,88}{39,6} \cdot 10^{-3} = 307,91 \text{ kN}$$

- 2. Způsob porušení

$$n = \min(e_{min}; 1,25m_{p1}) = \min(50; 60; 1,25 \cdot 39,6) = 49,6 \text{ mm}$$

$$M_{pl,2,Rd,r1,c} = \frac{0,25 \cdot L_{eff,2,b} \cdot t_p^2 \cdot f_p}{\gamma_{M0}} = \frac{0,25 \cdot 241,8 \cdot 22^2 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6} = 6,88 \text{ kNm}$$

$$F_{T,2,Rd,ep} = \frac{2 \cdot M_{pl,2,Rd,r1,c} + n \sum F_{t,Rd}}{m_{p1} + n} = \frac{2 \cdot 6,88 + 49,6 \cdot 2 \cdot 403,92}{39,6 + 49,6}$$

$$= 602,98 \text{ kN}$$

- 3. Způsob porušení

$$F_{T,3,Rd,ep} = \sum F_{T,Rd} = 2 \cdot 403,92 = 807,84 \text{ kN}$$

$$F_{T,Rd,ep,row2} = \min(F_{T,1,Rd,ep}; F_{T,2,Rd,ep}; F_{T,3,Rd,ep}) = \min(307,91; 602,98; 807,84) \\ = 307,91 \text{ kN}$$

Rozhoduje způsob porušení 1

Stěna sloupu v příčném tahu

Převodní součinitel

$\beta = 1$ jednostranný styčnick

Účinná výška stěny je rovna účinné délce nevyztužení pásnice sloupu v příčném ohybu:

$$b_{eff,t,wc} = L_{eff,c} = 143,9 \text{ mm}$$

Smyková plocha sloupu:

$$A_{vc} = 4743 \text{ mm}^2$$

Redukční součinitel interakce se smykem:

$$\omega_{r1,c} = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{b_{eff,t,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{143,9 \cdot 11}{4743} \right)^2}} = 0,935$$

Návrhová únosnost nevyztužené stěny v příčném tahu:

$$F_{t,wc,Rd,row2} = \frac{\omega_{r1,c} b_{eff,t,wc} t_{wc} f_{yc}}{\gamma_{M0}} = \frac{0,935 \cdot 143,9 \cdot 11 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-3} \\ = 347,63 \text{ kN}$$

Stěna nosníku v tahu

Účinná výška

$$b_{eff,t,wb} = L_{eff,b} = 241,8 \text{ mm}$$

Návrhová únosnost stojiny nosníku v tahu

$$F_{t,wb,Rd,row2} = \frac{b_{eff,t,wb} \cdot t_{wb} \cdot f_{y,wb}}{\gamma_{M0}} = \frac{241,8 \cdot 9,4 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-3} = 534,19 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost 2. řady šroubů:

$$F_{t,Rd,row1} = \min(F_{T,Rd,fc,row2}; F_{T,Rd,ep,row2}; F_{t,wc,Rd,row2}; F_{t,wb,Rd,row2}) = \\ \min(533,03; 307,91; 347,63; 534,19) = 307,91 \text{ kN}$$

d) Tlačená oblast styčnicku**i. Stěna sloupu v příčném tlaku**

Účinná šířka stěny sloupu v tlaku:

$$b_{eff,c,wc} = t_{fb} + 2\sqrt{2}a_{cf} + 5(t_{fv} + r_c) + \sqrt{2}t_p = 14,6 + 2\sqrt{2} \cdot 7 + 5(19 + 27) + \sqrt{2} \cdot 22 = 295,51 \text{ mm}$$

Redukční součinitel interakce se smykem:

$$\omega_{r1,c} = \omega_1 = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{b_{eff,t,wc} t_{wc}}{A_{vc}} \right)^2}} = \frac{1}{\sqrt{1 + 1,3 \left(\frac{295,51 \cdot 11}{4743} \right)^2}} = 0,788$$

Redukční součinitel normálového napětí:

$$k_{wc} = 0,7 \quad \dots \quad \text{konzervativní hodnota}$$

Desková štíhlost:

$$d_{wc} = h_c - 2(t_{fc} + r_c) = 300 - 2(19 + 27) = 208 \text{ mm}$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,932 \sqrt{\frac{b_{eff,c,wc} d_{wc} f_{y,wc}}{E t_{wc}^2}} = 0,932 \sqrt{\frac{295,51 \cdot 208 \cdot 235}{210000 \cdot 11^2}} = 0,703$$

$$\bar{\lambda}_p = 0,703 \leq 1 \quad \Rightarrow \quad \rho = 1,0$$

Návrhová únosnost nevyztužené stěny sloupu v příčném tlaku:

$$F_{c,wc,Rd} = \frac{\omega_c k_{wc} \rho_c b_{eff,c,wc} t_{wc} f_{y,wc}}{\gamma_{M1}} = \frac{0,788 \cdot 0,7 \cdot 1 \cdot 295,51 \cdot 11 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-3} = 421,34 \text{ kN}$$

ii. Pásnice a stojina nosníku v tlaku

Návrhová momentová únosnost:

$$M_{c,Rd} = \frac{W_{pl,y} \cdot f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1,7 \cdot 10^6 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6} = 399,92 \text{ kNm}$$

Návrhová únosnost pásnice a stojiny nosníku v tlaku

$$F_{c,fb,Rd} = \frac{M_{c,Rd}}{h_b - t_{fb}} = \frac{399,92}{450 - 14,6} \cdot 10^{-3} = 918,51 \text{ kN}$$

Výsledná únosnost tlačené oblasti:

$$F_{t,Rd,row1} = \min(F_{c,wc,Rd}; F_{c,fb,Rd};) = \min(421,34; 918,51) = 307,91 \text{ kN}$$

Tahové síly ze šroubů jsou větší než tlaková únosnost stěny sloupu

Jelikož je tahová síla větší než tlaková únosnost stěny sloupu, bude tímto styčník velmi omezen a jeho výsledná únosnost bude podstatně menší, z tohoto důvodu je možné navrhnout výztuhy mezi pásnice sloupu do tlačené oblasti, tímto se eliminuje nevyhovující stěna v tlaku a tlaková únosnost se bude rovnat tahovým silám z řad šroubů.

iii. Návrh výztuhy

Šířka výztuhy:

$$s_s = 140 \text{ mm}$$

Osová vzdálenost výztuh:

$$d_s = h_b - t_{fb} = 450 - 14,6 = 435,4 \text{ mm}$$

Moment únosnosti výztuh:

$$M_{pl,s,Rd} = 2s_s \cdot d_s \cdot f_y = 2 \cdot 140 \cdot 435,4 \cdot 235 \cdot 10^{-6} = 28,65 \text{ kNm}$$

Rozměr smykového pole:

$$z_{min} = \min(h_c - t_{fc}; h_b - t_{fb}) = \min(281; 435,4) = 281 \text{ mm}$$

Návrh tloušťky výztuhy:

$$t_s = \frac{F_{c,fb,Rd} \cdot z_{min}}{M_{pl,s,Rd}} = \frac{918,51 \cdot 281}{28,65} \cdot 10^{-3} = 9,01 \text{ mm} = 10 \text{ mm}$$

Výsledná únosnost tlačené oblasti:

$$F_{t,Rd,row1} = \min(F_{c,wc,Rd}; F_{c,fb,Rd}) = \min(605,23; 918,51) = 605,23 \text{ kN}$$

Tlačená oblast je vyhovující vůči tahovým silám ze šroubů

e) Panel stěny sloupu ve smyku

Ověření štíhlosti stěny sloupu:

$$\frac{d_c}{t_{wc}} = \frac{208}{11} = 18,91 \leq 69 \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 69 \sqrt{\frac{235}{235}} = 69$$

VYHOVÍ

Návrhová únosnost nevyztuženého panelu stěny sloupu ve smyku:

$$V_{wp,Rd} = \frac{0,9f_{y,wc}A_c}{\sqrt{3}\gamma_{M0}} = \frac{0,9 \cdot 235 \cdot 4743}{\sqrt{3} \cdot 1,0} \cdot 10^{-3} = 579,17 \text{ kN}$$

Smyková únosnost panelu stěny sloupu ve smyku je menší než tahové síly ve šroubech.

i. Návrh výztuhy

Stejně jak tomu bylo v případě tlačené oblasti styčnicku, i zde síly ve šroubech převažují smykovou únosnost panelu stěny sloupu, v tomto případě by byla momentová únosnost styčnicku negativně ovlivněna, proto tedy je možno dle ČSN EN 1993-1-8 navrhnout výztuhy.

Tloušťka výztuhy:

$$t_{st} = 10 \text{ mm}$$

Šířka výztuhy:

$$s_s = 140 \text{ mm}$$

Vzdálenost výztuh:

$$d_s = h_b - t_{fb} = 450 - 14,6 = 435,4 \text{ mm}$$

Momentová únosnost pásnice sloupu:

$$M_{pl,fc,Rd} = \frac{W_{pl,fc} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{1,81 \cdot 10^4 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6} = 4,24 \text{ kNm}$$

Momentová únosnost výztuhy:

$$M_{pl,st,Rd} = \frac{W_{pl,st} f_y}{\gamma_{M0}} = \frac{2,05 \cdot 10^5 \cdot 235}{1,0} \cdot 10^{-6} = 48,06 \text{ kNm}$$

Příspěvek výztuhy k smykové únosnosti:

$$V_{wp,add,Rd} = \frac{4M_{pl,fc,Rd}}{d_s} = \frac{4 \cdot 4,24}{435,4} \cdot 10^{-3} = 38,97 \text{ kN}$$

$$V_{wp,add,Rd} \leq \frac{2M_{pl,fc,Rd} + 2M_{pl,st,Rd}}{d_s} = \frac{2 \cdot 4,24 + 2 \cdot 48,06}{0,4354} = 240,23 \text{ kN}$$

VYHOVÍ

Celková únosnost vyztuženého panelu stěny sloupu ve smyku:

$$V_{wp,st,Rd} = V_{wp,Rd} + V_{wp,add,Rd} = 579,17 + 38,97 = 618,13 \text{ kN}$$

Smyková únosnost stěny sloupu ve smyku je větší než tahové síly ve šroubech

f) Návrhová momentová únosnost styčnicku

Návrhové únosnosti řad šroubů:

$$F_{T,Rd,row1} = 297,32 \text{ kN}$$

$$F_{T,Rd,row2} = 307,91 \text{ kN}$$

$$V_{wp,Rd} = 579,17 \text{ kN} \quad \dots \quad \text{Smyková únosnost}$$

$$F_{c,Rd} = 421,34 \text{ kN} \quad \dots \quad \text{Únosnost v tlaku}$$

Celková tahová síla:

$$F_{T,Rd,row i} = F_{T,Rd,row1} + F_{T,Rd,row2} = 297,32 + 307,91 = 605,23 \text{ kN}$$

Z důvodu, že styčník není vyztužen, je potřeba redukovat tahovou sílu v nejspodnější řadě šroubů:

Účinné návrhové únosnosti pro nevyztužený styčník:

$$F_{t1,Rd} = 297,32 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd} = 307,91 - (605,23 - \min(579,17; 421,34)) = 124,02 \text{ kN}$$

Účinné návrhové únosnosti pro vyztužený styčník tlakovou výztuhou:

$$F_{t1,Rd,c} = 297,32 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd,c} = 307,91 - (605,23 - 579,17) = 281,84 \text{ kN}$$

Účinné návrhové únosnosti pro vyztužený styčník tlakovou a smykovou výztuhou:

$$F_{t1,Rd,wc} = 297,32 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd,wc} = 307,91 \text{ kN}$$

Vzdálenost jednotlivých řad od středu otáčení spoje:

$$h_1 = 492,7 \text{ mm}$$

$$h_2 = 342,7 \text{ mm}$$

Ověření křehkého porušení řady šroubů:

$$F_{t1,Rd,c,wc} = 297,32 \text{ kN} \leq 1,9F_{t,Rd} = 1,9 \cdot 403,92 = 797,448 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd} = 124,02 \text{ kN} \leq 1,9F_{t,Rd} = 1,9 \cdot 403,92 = 797,448 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd,c} = 281,84 \text{ kN} \leq 1,9F_{t,Rd} = 1,9 \cdot 403,92 = 797,448 \text{ kN}$$

$$F_{t2,Rd,c,wc} = 307,91 \text{ kN} \leq 1,9F_{t,Rd} = 1,9 \cdot 403,92 = 797,448 \text{ kN}$$

Je možné uvažovat s plastickým rozdělením sil

Návrhová momentová únosnost:

$$M_{j,Rd} = F_{t1,Rd}h_1 + F_{t2,Rd}h_2 = 297,32 \cdot 0,492 + 124,02 \cdot 0,342 = 188,99 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd,c} = F_{t1,Rd}h_1 + F_{t2,Rd,c}h_2 = 297,32 \cdot 0,492 + 281,84 \cdot 0,342 = 243,08 \text{ kNm}$$

$$M_{j,Rd,c,wc} = F_{t1,Rd}h_1 + F_{t2,Rd,c,wc}h_2 = 297,32 \cdot 0,492 + 307,91 \cdot 0,342 \\ = 252,01 \text{ kNm}$$

g) Návrhová smyková únosnost styčnicku

Únosnost šroubů ve smyku:

$$F_{v,Rd} = 2 \frac{0,5f_{ub}A_s}{\gamma_{M2}} = 2 \frac{0,5 \cdot 1000 \cdot 561}{1,25} \cdot 10^{-3} = 448,8 \text{ kN}$$

Únosnost šroubů v otlačení:

$$\alpha = \min \left\{ \begin{array}{l} \frac{f_{ub}}{f_{up}} = \frac{1000}{360} = 2,78 \\ \frac{p_1}{3d_0} - 0,25 = \frac{300}{3 \cdot 33} - 0,25 = 2,78 \\ 1,0 \end{array} \right\} = 1,0$$

$$k_1 = \min \left\{ \begin{array}{l} 2,8 \frac{e_2}{d_0} - 1,7 = 2,8 \frac{100}{33} - 1,7 = 6,78 \\ 1,4 \frac{p_2}{d_0} - 1,7 = 1,4 \frac{100}{33} - 1,7 = 2,54 \\ 2,5 \end{array} \right\} = 2,5$$

$$F_{b,Rd} = 2 \frac{k_1 \alpha f_u d t}{\gamma_{M2}} = 2 \frac{2,5 \cdot 1,0 \cdot 360 \cdot 30 \cdot 19}{1,25} = 820,8 \text{ kN}$$

h) Rotační tuhost styčnicku

Pro 1. řadu šroubů:

- Pásnice sloupu v ohybu

$$k_4^I = \frac{0,9L_{eff,c}t_{fc}^3}{m_{c1}^3} = \frac{0,9 \cdot 125 \cdot 19^3}{22,9^3} = 64,24 \text{ mm}$$

- Čelní deska v ohybu

$$k_5^I = \frac{0,9L_{eff,b}t_p^3}{m_{px}^3} = \frac{0,9 \cdot 110 \cdot 22^3}{42,1^3} = 14,15 \text{ mm}$$

- Stěna sloupu v tahu

$$k_3^I = \frac{0,7b_{eff,t,wc}t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \cdot 125 \cdot 11}{56} = 4,63 \text{ mm}$$

- Šrouby v tahu

$$k_{10}^I = \frac{1,6A_s}{L_b} = \frac{0,7 \cdot 561}{208} = 16,03 \text{ mm}$$

- Účinný součinitel tuhosti 1. řady šroubů

$$k_{eff,I} = \frac{1}{\frac{1}{k_4^I} + \frac{1}{k_5^I} + \frac{1}{k_3^I} + \frac{1}{k_{10}^I}} = \frac{1}{\frac{1}{64,24} + \frac{1}{14,15} + \frac{1}{4,63} + \frac{1}{16,03}} = 2,74 \text{ mm}$$

Pro 2. řadu šroubů:

- Pásnice sloupu v ohybu

$$k_4^I = \frac{0,9L_{eff,c}t_{fc}^3}{m_{c1}^3} = \frac{0,9 \cdot 143,9 \cdot 19^3}{22,9^3} = 73,96 \text{ mm}$$

- Čelní deska v ohybu

$$k_5^I = \frac{0,9L_{eff,b}t_p^3}{m_{px}^3} = \frac{0,9 \cdot 241,8 \cdot 22^3}{42,1^3} = 37,2 \text{ mm}$$

- Stěna sloupu v tahu

$$k_3^I = \frac{0,7b_{eff,t,wc}t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \cdot 143,9 \cdot 11}{208} = 5,33 \text{ mm}$$

- Šrouby v tahu

$$k_{10}^I = \frac{1,6A_s}{L_b} = \frac{0,7 \cdot 561}{56} = 16,03 \text{ mm}$$

- Účinný součinitel tuhosti 1. řady šroubů

$$k_{eff,I} = \frac{1}{\frac{1}{k_4^I} + \frac{1}{k_5^I} + \frac{1}{k_3^I} + \frac{1}{k_{10}^I}} = \frac{1}{\frac{1}{73,96} + \frac{1}{37,2} + \frac{1}{5,33} + \frac{1}{16,03}} = 3,44 \text{ mm}$$

Náhradní rameno vnitřních sil:

$$z_{eq} = \frac{\sum k_{eff,r} h_r^2}{\sum k_{eff,r} h_r} = \frac{2,74 \cdot 492,7^2 + 3,44 \cdot 342,7^2}{2,74 \cdot 492,7 + 3,44 \cdot 342,7} = 422,78 \text{ mm}$$

Náhradní součinitel tuhosti:

$$k_{eq} = \frac{\sum k_{eff,r} h_r}{h_{eq}} = \frac{2,74 \cdot 492,7 + 3,44 \cdot 342,7}{422,78} = 5,985 \text{ mm}$$

Pro tlačnou oblast:

- Pro nevyztužený styčník

$$k_2 = \frac{0,7b_{eff,wc}t_{wc}}{d_c} = \frac{0,7 \cdot 295,51 \cdot 11}{208} = 10,940 \text{ mm}$$

- Pro styčník s tlakovou výztuhou

$$k_2 = 0$$

Panel stěny sloupu ve smyku:

- Pro nevyztužený styčník

$$k_1 = \frac{0,38A_{vc}}{\beta z_{eq}} = \frac{0,38 \cdot 4743}{1,0 \cdot 422,78} = 4,263 \text{ mm}$$

- Pro styčník se smykovou výztuhou

$$k_1 = 0$$

i) Výsledná rotační pružná tuhost styčníku

i. Pro styčník bez výztuh

$$S_{j,ini} = \frac{Ez_{eq}^2}{\sum \frac{1}{k_i}} = \frac{210000 \cdot 422,78^2}{\frac{1}{4,263} + \frac{1}{10,940} + \frac{1}{5,985}} = 76126,99 \text{ kNm/rad}$$

ii. Pro styčník s výztuhou v tlačené oblasti

$$S_{j,ini} = \frac{Ez_{eq}^2}{\sum \frac{1}{k_i}} = \frac{210000 \cdot 422,78^2}{\frac{1}{4,263} + \frac{1}{0} + \frac{1}{5,985}} = 93452,56 \text{ kNm/rad}$$

iii. Pro styčník s výztuhami v tlačené a smykové oblasti

$$S_{j,ini} = \frac{Ez_{eq}^2}{\sum \frac{1}{k_i}} = \frac{210000 \cdot 422,78^2}{\frac{1}{0} + \frac{1}{0} + \frac{1}{5,985}} = 224654,12 \text{ kNm/rad}$$

j) Výpočet deformace u_z pro ohybový moment $M = 100 \text{ kNm}$

i. Pro styčník bez rotační tuhosti

$$u_z = \frac{M \cdot 0,5 \cdot l_1^2}{E_1 \cdot I_1} + \frac{M \cdot l_1 \cdot l_2}{E_2 \cdot I_2} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 2,38^2}{210 \cdot 10^9 \cdot 3,37 \cdot 10^{-4}} + \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 2,38 \cdot 2,575}{210 \cdot 10^9 \cdot 3,37 \cdot 10^{-4}} = 0,0155 \text{ m}$$

ii. Model 1 - styčník bez výztuh

$$u_z = \frac{M \cdot 0,5 \cdot l_1^2}{E_1 \cdot I_1} + \frac{M \cdot l_1 \cdot l_2}{E_2 \cdot I_2} + \frac{M \cdot l_1}{k_\phi} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 2,38^2}{210 \cdot 10^9 \cdot 3,37 \cdot 10^{-4}} + \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 2,38 \cdot 2,575}{210 \cdot 10^9 \cdot 3,37 \cdot 10^{-4}} + \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 2,38}{76,127 \cdot 10^6} = 0,0187 \text{ m}$$

iii. Model 2 - styčník s výztuhami v tlačené oblasti

$$u_z = \frac{M \cdot 0,5 \cdot l_1^2}{E_1 \cdot I_1} + \frac{M \cdot l_1 \cdot l_2}{E_2 \cdot I_2} + \frac{M \cdot l_1}{k_\phi} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 2,38^2}{210 \cdot 10^9 \cdot 3,37 \cdot 10^{-4}} + \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 2,38 \cdot 2,575}{210 \cdot 10^9 \cdot 3,37 \cdot 10^{-4}} + \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 2,38}{93,45 \cdot 10^6} = 0,0181 \text{ m}$$

iv. Model 3 a 4 - styčník s výztuhami v tlačené a smykové oblasti

$$u_z = \frac{M \cdot 0,5 \cdot l_1^2}{E_1 \cdot I_1} + \frac{M \cdot l_1 \cdot l_2}{E_2 \cdot I_2} + \frac{M \cdot l_1}{k_\phi} = \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 0,5 \cdot 2,38^2}{210 \cdot 10^9 \cdot 3,37 \cdot 10^{-4}} + \frac{100 \cdot 10^3 \cdot 2,38 \cdot 2,575}{210 \cdot 10^9 \cdot 3,37 \cdot 10^{-4}} +$$

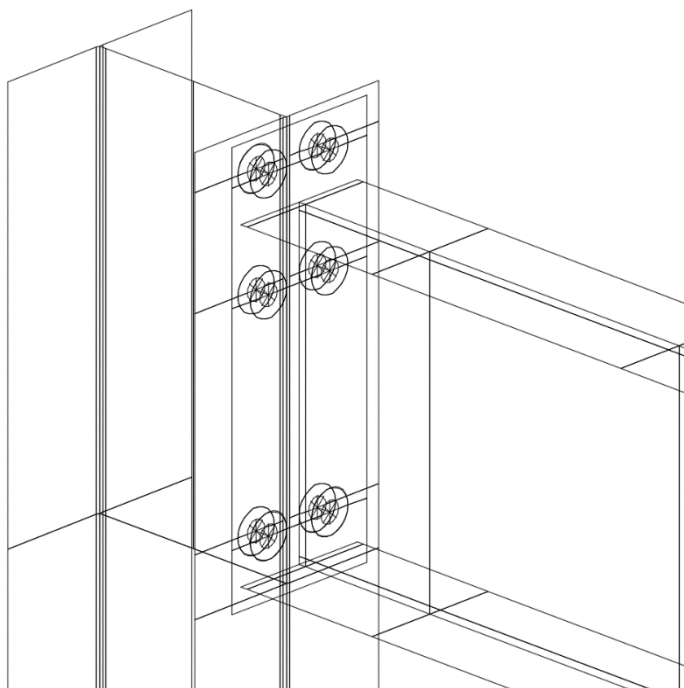
$$\frac{100 \cdot 10^3 \cdot 2,38}{224,65 \cdot 10^6} = 0,0167 \text{ m}$$

5.2. Skořepinový model rámového rohu

Z metody komponent byly získány tuhosti pro tři varianty rámového rohu, které se liší přidáním výztuh do oblastí, kde styčník nevyhovoval v tlačené a smykové oblasti. Tyto výsledky budou využity pro srovnání se skořepinovým modelem vytvořeným v programu Scia Engineer.

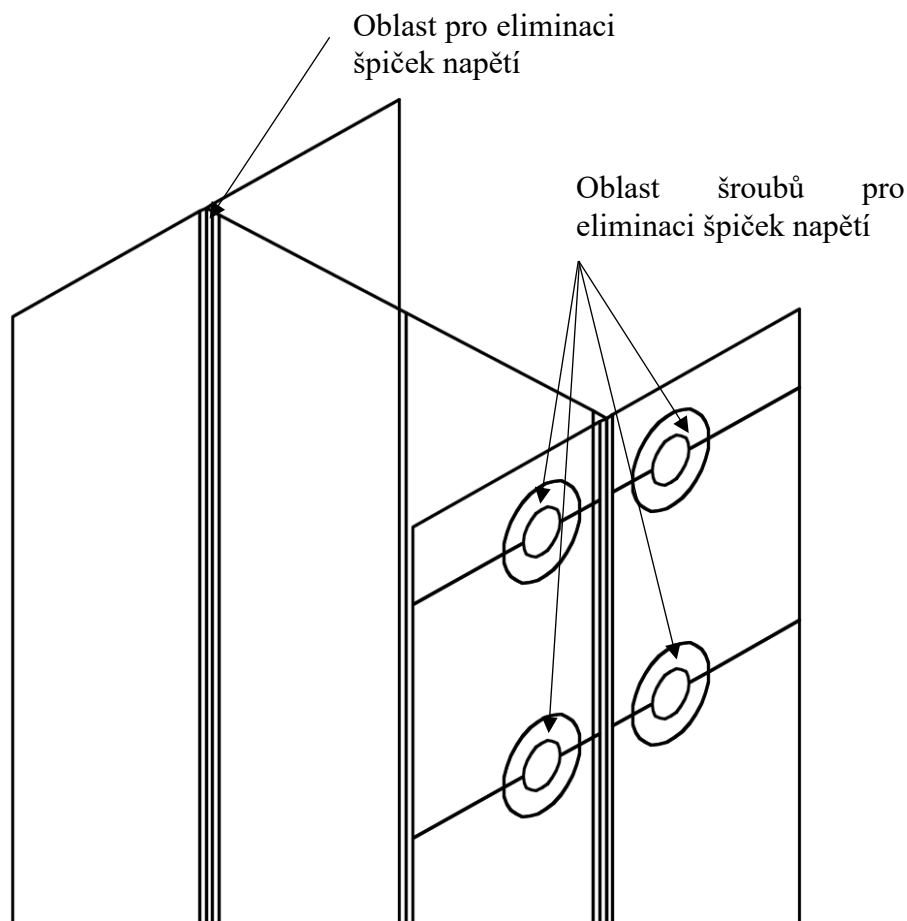
a) Tvorba skořepinového modelu

Pro vytvoření skořepinového modelu je vhodné využít program AutoCad, kde se vymodelují střednice jednotlivých ploch, které tvoří stěny, pásnice sloupu či příče a styčnickovou desku.



Obrázek 19 - Řešený rámových roh vytvořený ze střednicových ploch

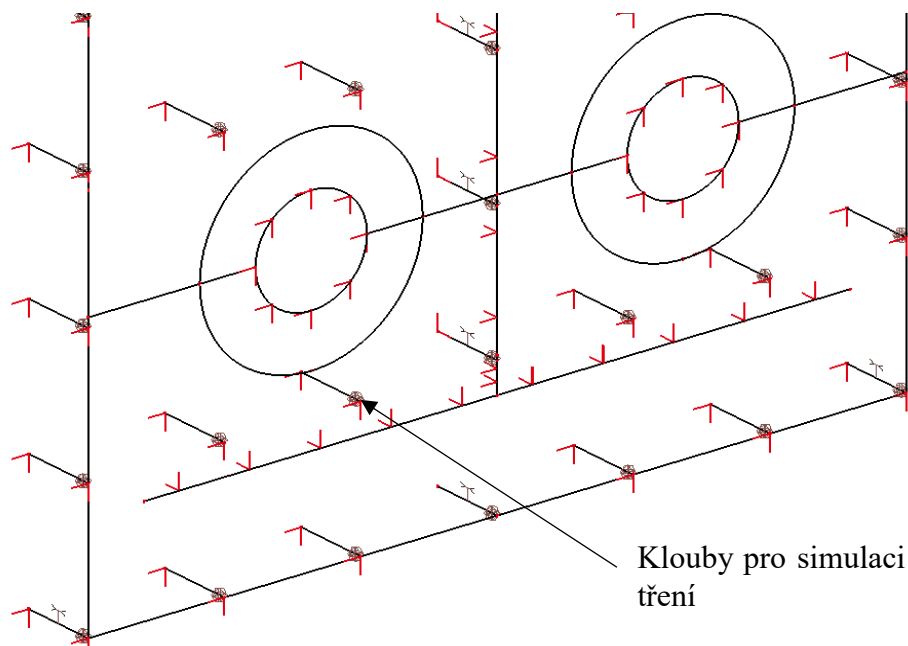
Z důvodu, že v numerickém modelu v oblasti styku dvou ploch vznikají numerické špičky napětí, je vhodné jednotlivé plochy rozdělit na menší oblasti, které eliminují tvorbu vysokého napětí. Další oblastí, kde je nutno zabránit vzniku těchto napětí, je v oblasti šroubů, zde je potřeba vytvořit kruhovou oblast kolem otvoru pro šrouby.



Obrázek 20 - Řešení otvorů pro šrouby

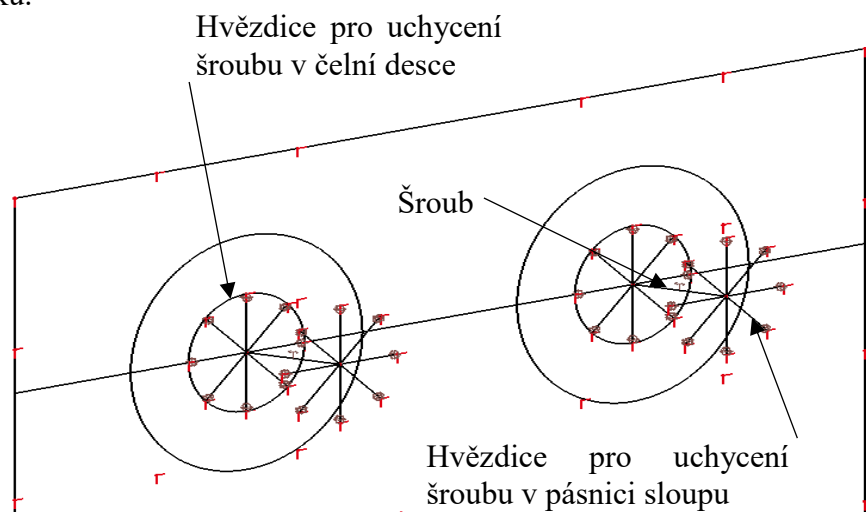
Mezi čelní deskou a pásnicí sloupu je kontakt zajištěn řadami malých prutů o délce rovné vzdálenosti mezi střednicemi pásnice sloupu a čelní desky. Tento způsob kontaktu je zvolen takto, protože program Scia Enginner není schopen výpočtu za využití objemů jednotlivých prvků. Tyto malé pruty mají určený specifický materiál, který se liší od běžné oceli tím, že modul pružnosti v tahu a tlaku má zvětšený o jeden řád. Tímto se zajistí přenos vnitřních sil a deformace budou minimálně ovlivněny. Výsledná deformace styčnicku může být poměrně výrazně ovlivněna počtem těchto prvků, které působí v ploše styčnickové desky. Na těchto prvcích je nutné zvolit nelinearity, respektive vyloučit tah, což znamená, že horní prvky nebudou aktivní a nebudou ovlivňovat deformace styčnicku. Dalším faktorem ovlivňujícím výsledky je tření mezi čelní deskou a pásnicí sloupu. Tření je v numerickém modelu zajištěno vložením kloubu s určitou tuhostí, reálnou hodnotu tření je vhodné zjistit laboratorními zkouškami na skutečném modelu. Nicméně pro řešené modely bylo zjištěno, že tento vliv tření má minimální vliv na celkový

výsledek, proto byly zvoleny jen volné klouby ve všech směrech kromě posunu v ose x a ve všech pootočeních.



Obrázek 21 - Řešení styku mezi čelní deskou a pásnicí sloupu

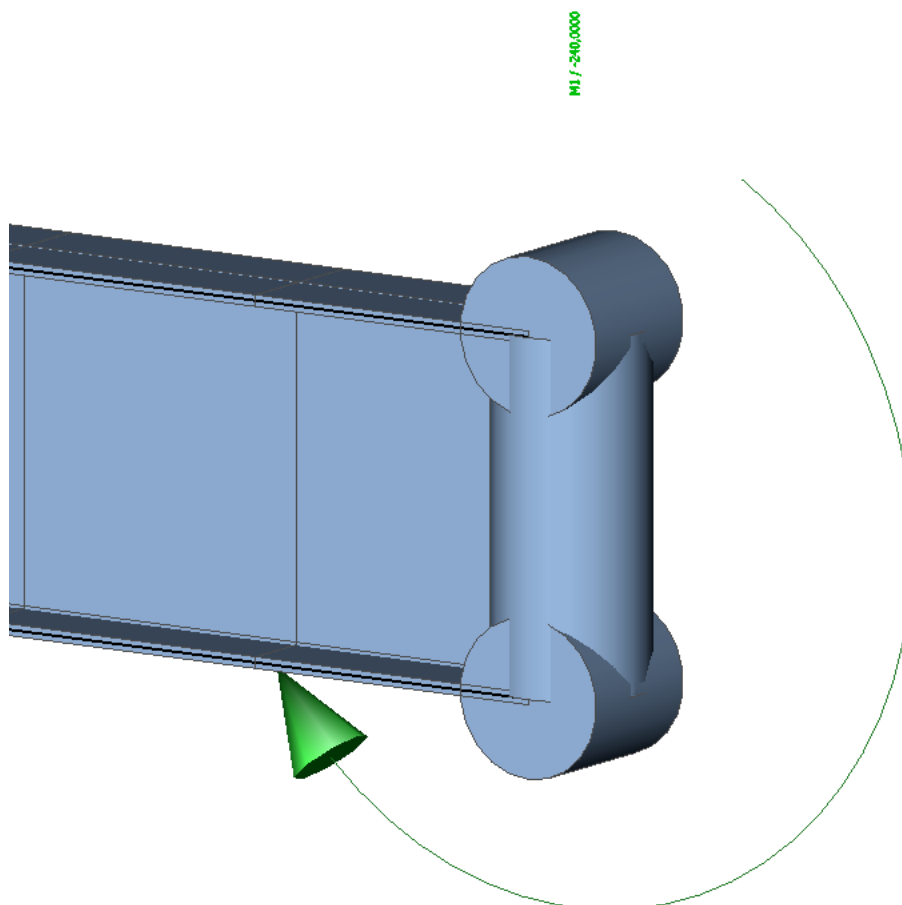
Pro uchycení šroubů v modelu je nutné vytvořit hvězdici z prvků o délce průměru otvoru pro šroub, které jsou ze stejného materiálu jak již zmiňované úchopové pruty výše. Tato hvězdice je modelována jak v pásnici sloupu, tak v čelní desce. Pomocí uzlů je uchycena k výše zmíněným prvkům styčníku, obdobně jako u úchopových prvků čelní desky je i u těchto prutů simulováno tření. Šrouby jsou tvořeny z reálného materiálu patřící šroubům M10.9, které jsou ve výpočtu použity. Šroubům je vyloučen tlak, tedy spodní šrouby ve spodní části styčníku nepůsobí v tlaku.



Obrázek 22 - Model hvězdice pro uchycení šroubů

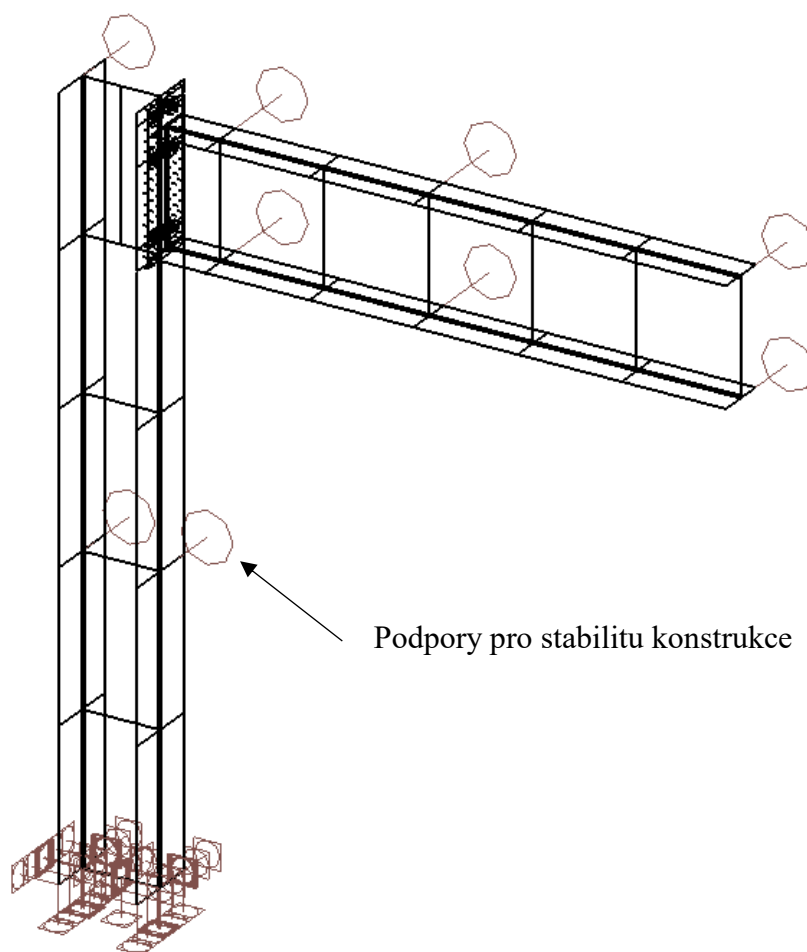
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zatížení styčníků bylo tvořeno na konci příčle v polovině profilu ohybovým momentem. Toto zatížení na konci příčle extrémně zkresluje deformace, z důvodu uzlového zatížení na skořepině. Z této skutečnosti se konec příčle vyztuží ideálními pruty o velkém průřezovém profilu, kde byl těmto prvkům zvýšen modul pružnosti o jeden řád a hmotnost snížena o dva řády.



Obrázek 23 - Vyztužení konce příčle ideálním prutem

V poslední řadě je nutno vyřešit stabilitu styčnicku, respektive celé modelované konstrukce, aby se styčník deformoval pouze v rovině z . Tuto stabilitu je možno vyřešit použitím podpor na hraně skořepiny, kde bude použita pouze podpora kolmo na rovinu z . Tyto podpory mohou ovlivnit deformaci, proto je vhodné zvolit takovou podporu, která vyhovuje deformací ve srovnání s vypočtenou deformací u_z . Pro řešený styčník byly použity podpory pouze v určitých uzlech, které jsou pro daný styčník nejvíce vyhovující z hlediska deformace konstrukce. Sloup je modelován jako vetknutý.



Obrázek 24 - Celkový skořepinový model s podporami pro stabilitu modelu

5.3. Výsledky skořepinového modelu

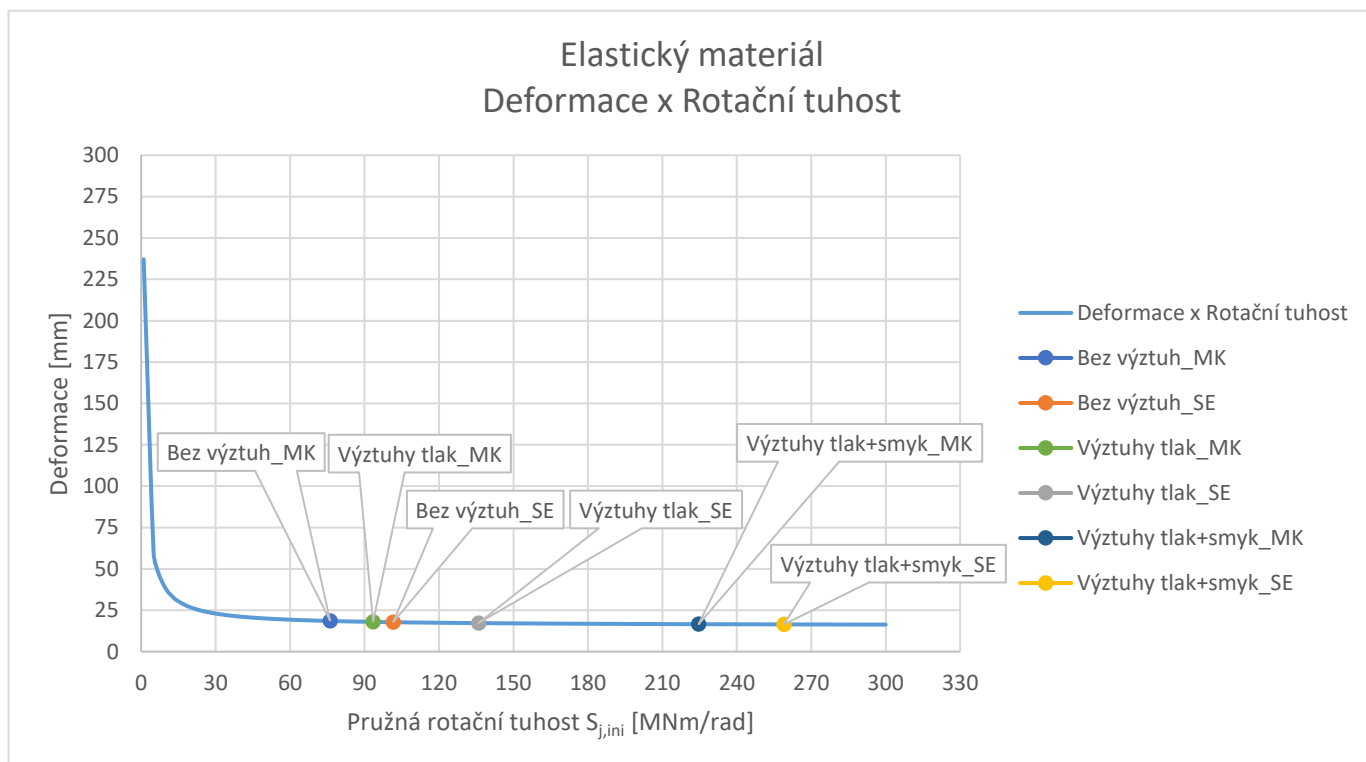
a) Elastický materiál

Pro ověření výpočetního modelu pro další postup analýzy styčníku bylo nutné nejprve vytvořit skořepinový model s elastickým materiálem. Tímto se ověřily ruční výpočty z metody komponent a správnost modelu byla vyhodnocena na základě výsledků blíží se k výsledkům z metody komponent. Tvorba modelu a jeho funkčnost byly pospány v kapitole 5.2..

Jelikož by bylo velmi složité určit tuhost styčníku přímo ze skořepinového modelu, byl využit prutový model, který má stejné rozměry a byl vytvořen ze stejných prvků jako posuzovaný styčník. Prutový model se vymodeluje ve 2D pracovním prostoru, podpora zůstává stejná jako u skořepinového modelu a do příčle na straně sloupu se vloží kloub s pružným pootočením. Kloub bude ve všech směrech tuhý a v pootočení bude hledána tuhost, která odpovídá deformaci získané ze skořepinového modelu při stejném zatížení o ohybovém momentu $M =$

DIPLOMOVÁ PRÁCE

100 kNm. Tato výsledná tuhost je dále porovnána s metodou komponent viz graf níže.



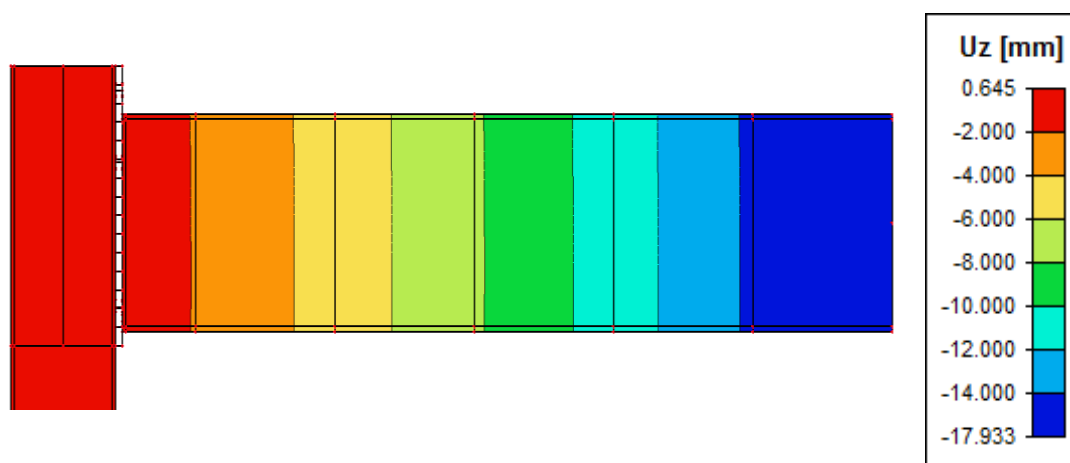
Graf 1 - Elastický materiál, Deformace x Rotační tuhost

Z grafu je patrné, že výsledky získané z programu Scia Enginner jsou vyšší než hodnoty získané ručním výpočtem za pomoci metody komponent. Níže v tabulce jsou výsledky porovnány a vyhodnoceny jejich procentuální rozdíly.

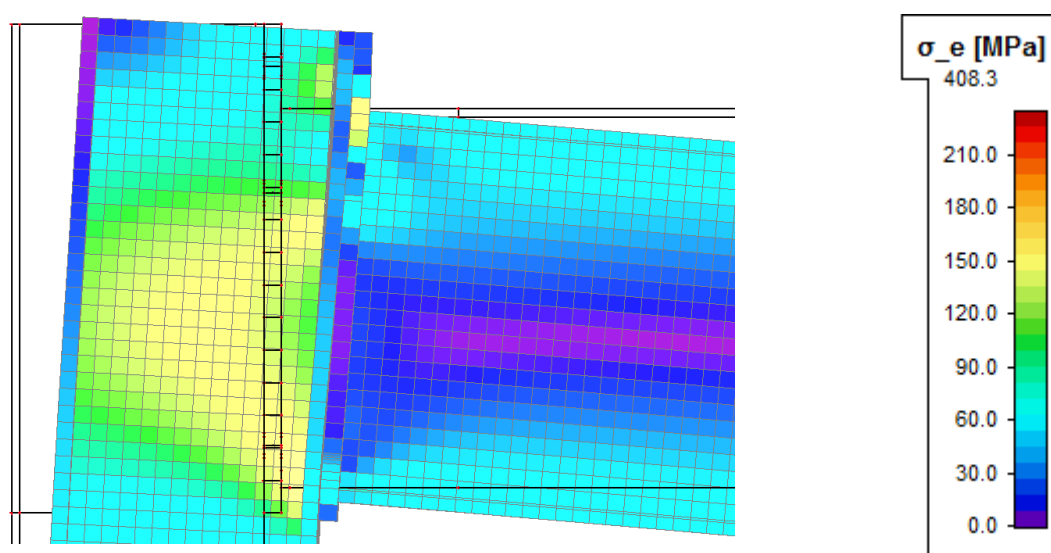
Tabulka 9 - Srovnávací tabulka výpočtů z metody komponent a skořepinového modelu

Typ styčníku	$S_{j,ini}$ [MNm/rad]	u_z [mm]	[%]
Styčník bez výztuh - MK	79,126	18,724	25,06
Styčník bez výztuh - SE	101,590	17,933	
Styčník s tlak. výztuhami - MK	93,452	18,144	31,28
Styčník s tlak. výztuhami - SE	136,000	17,343	
Styčník s tlak.+smyk. výztuhami - MK	224,654	16,657	13,26
Styčník s tlak.+smyk. výztuhami – SE	259,000	16,512	

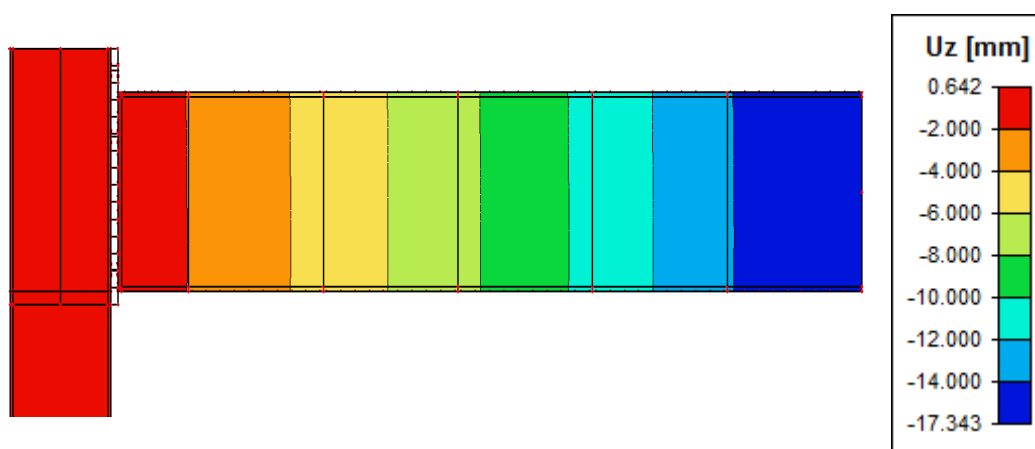
* MK – Metoda Komponent; SE – Scia Engineer



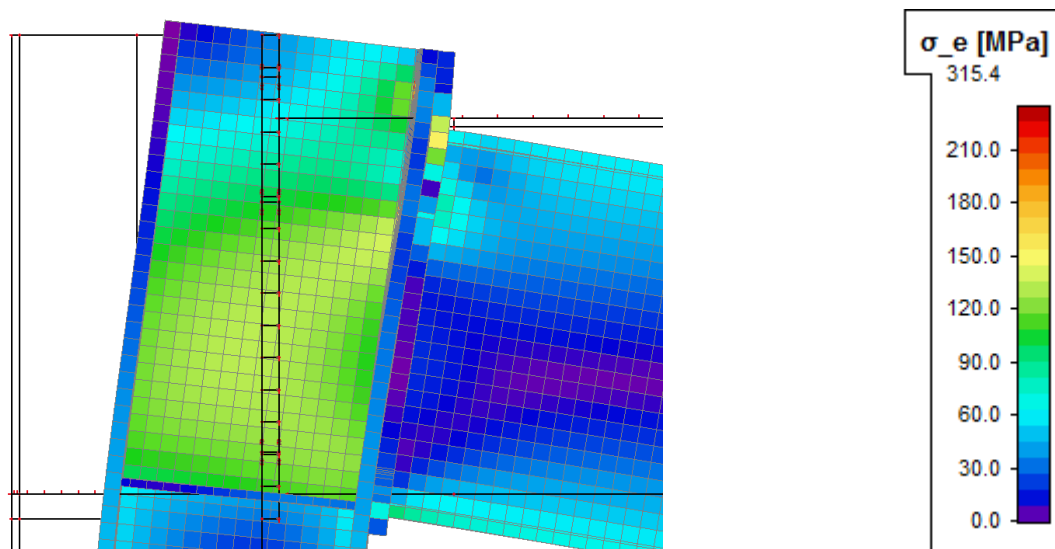
Obrázek 25 - Svislá deformace u_z nevztuženého styčníku za použití elastického materiálu



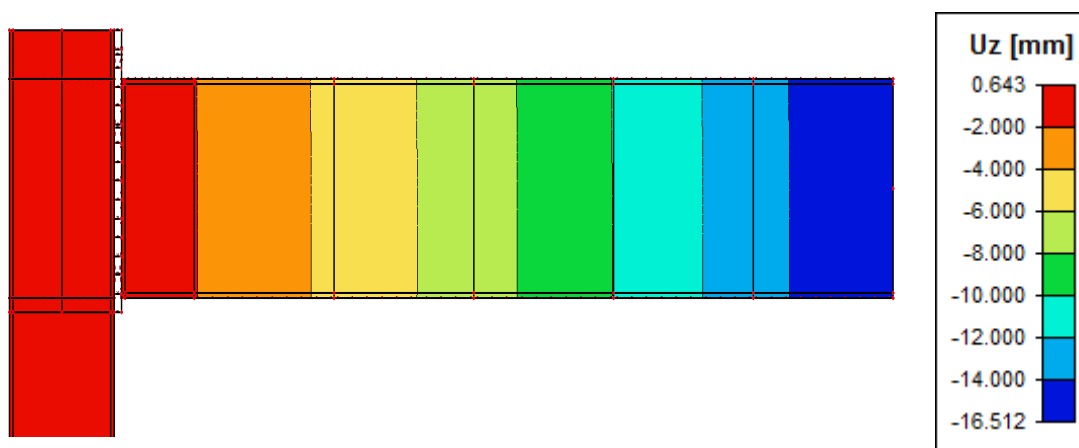
Obrázek 26 - Napětí σ_e na nevztuženém styčníku za použití elastického materiálu



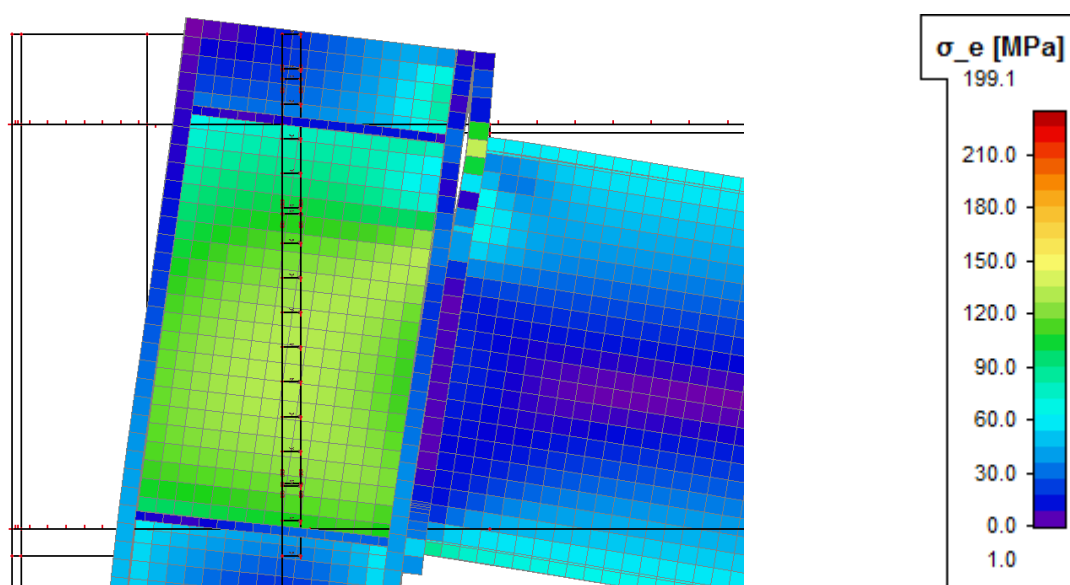
Obrázek 27 - Svislá deformace u_z vztuženého styčníku v tlačené oblasti za použití elastického materiálu



Obrázek 28 - Napětí σ_e na vyztuženém styčníku v tlačené oblasti za použití elastického materiálu

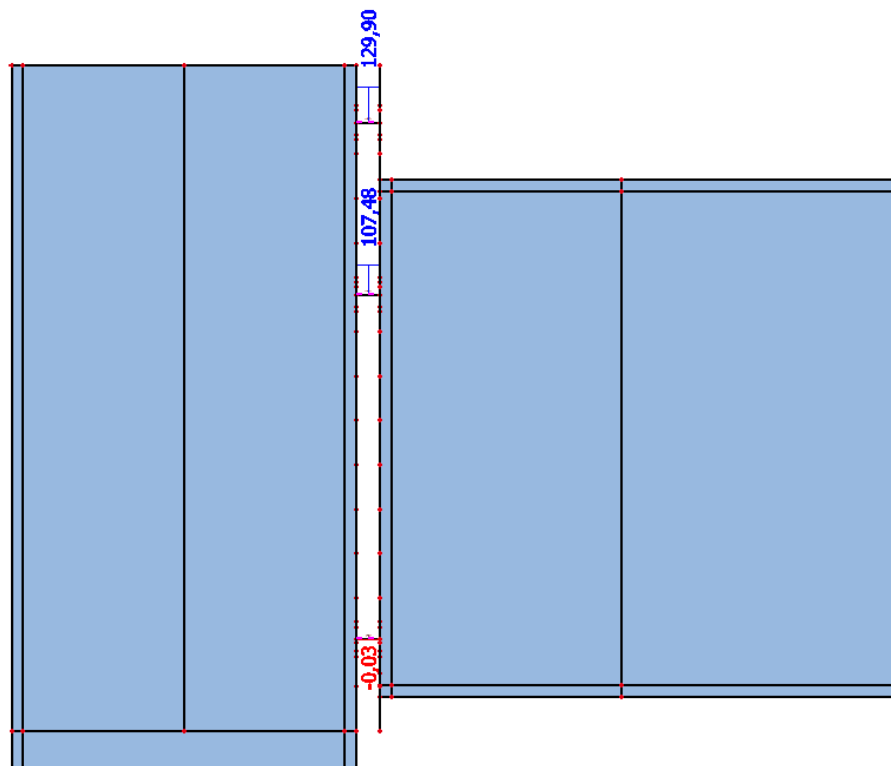


Obrázek 29 - Svislá deformace u_z vyztuženého styčníku v oblasti obou pásnic příčle za použití elastického materiálu



Obrázek 30 - Napětí σ_e vyztuženého styčníku v oblasti obou pásnic příčle za použití elastického materiálu

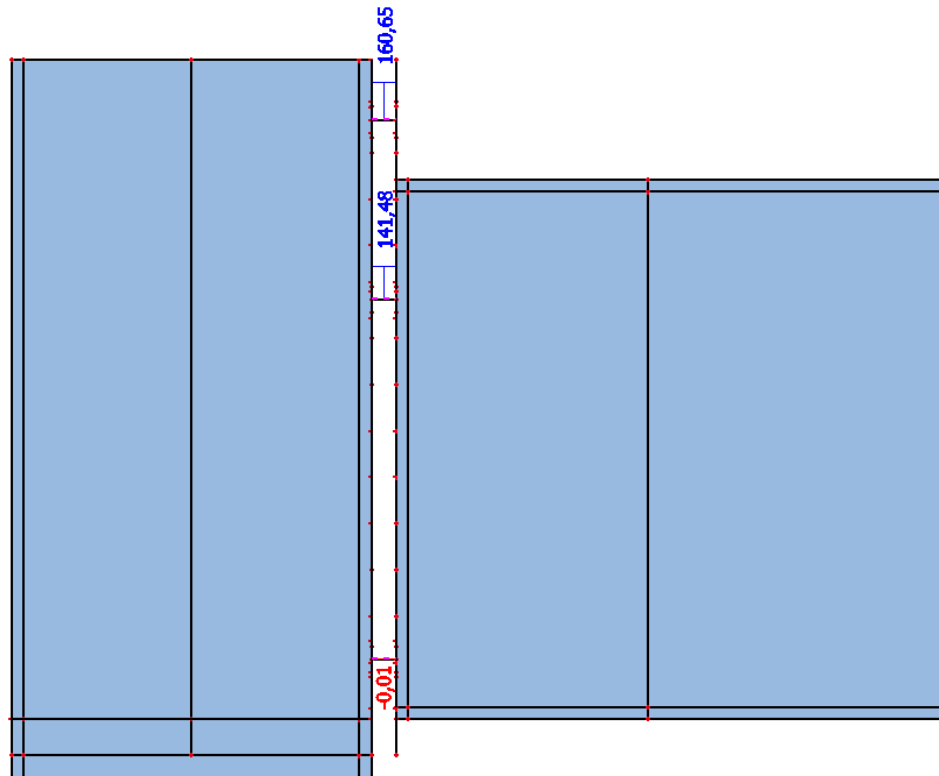
Dále je možné ze skořepinového modelu odečíst síly ve šroubech, které byly získány zatížením numerického modelu ohybovým momentem, který je spočten metodou komponent o hodnotě $M_{Rd} = 188,99 \text{ kNm}$. Dle ručního výpočtu vychází maximální síla do jednoho šroubu v první řadě $F_{T,Rd,1,row1} = 148,66 \text{ kN}$, v druhé řadě to je díky redukci síly viz kap. 5.1. $F_{T,Rd,1,row2} = 62,01 \text{ kN}$.



Obrázek 31 - Normálové síly ve šroubech nevyztuženého styčnicku

Z obrázku lze vyčíst, že v první řadě šroubů je tahová síla ve skořepinovém modelu pouze $F_{T,1,row1} = 129,9 \text{ kN}$, kdežto v druhé řadě je hodnota normálové síly $F_{T,1,row2} = 107,48 \text{ kN}$. Proto lze konstatovat, že druhá řada šroubů dle metody komponent nebude vyhovující. Ve spodní řadě šroubů, která se nachází v tlačené oblasti vychází téměř nulový tlak.

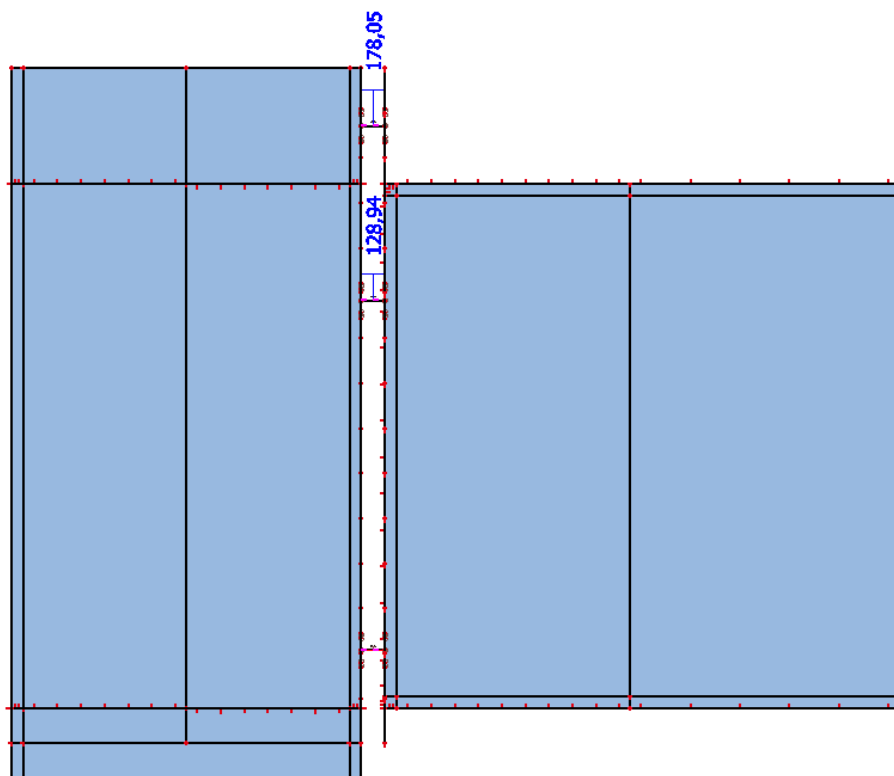
V případě druhého styčnicku s výztuhou v tlačené oblasti jsou návrhové síly z metody komponent následující: $F_{T,Rd,1,row1} = 148,66 \text{ kN}$, $F_{T,Rd,1,row2} = 140,92 \text{ kN}$. Pro ohybový moment $M_{Rd} = 243,08 \text{ kNm}$.



Obrázek 32 - Normálové síly ve šroubech vyztuženého styčnicku v tlačené oblasti

Na obrázku je patrné, že už v první řadě šroubů vychází větší tahová síla $F_{T,1,row1} = 160,65 \text{ kN}$, než je síla návrhová z ručního výpočtu. Pro druhou řadu je tahová síla $F_{T,1,row2} = 141,48 \text{ kN}$ téměř stejná jako síla $F_{T,Rd,1,row2} = 140,92 \text{ kN}$.

Pro třetí styčník s výztuhami jak v tlačené oblasti, tak v úrovni horní pásnice příčně jsou návrhové síly pro šrouby, pro první řadu $F_{T,1,row1} = 148,66 \text{ kN}$, pro řadu druhou $F_{T,Rd,1,row2} = 153,96 \text{ kN}$, kde návrhový moment je $M_{Rd} = 252,01 \text{ kNm}$.



Obrázek 33 - Normálové síly vyztuženého styčnicku v oblasti obou pásnic příčle za použití elastického materiálu

V numerickém modelu jsou tahové síly ve šroubech stejně jako v předchozích případech odlišné a to: $F_{T,1,row1} = 178,05 \text{ kN}$, $F_{T,1,row2} = 128,94 \text{ kN}$. Z těchto výsledků je patrné, že dle metody komponent je první řada šroubů nevyhovující.

Tabulka 10 - Srovnání tahových sil získaných metodou komponent a skořepinovým modelem

Typ styčnicku	Řada 1 MK	Řada 1 SE	Řada 2 MK	Řada 2 SE
Styčnick bez výztuh	148,66 kN	129,9 kN	62,01 kN	107,48 kN
Styčnick s výztuhou v tlačené oblasti	148,66 kN	160,65 kN	140,92 kN	141,48 kN
Styčnick s výztuhami v tlačené a smykové oblasti.	148,66 kN	178,05 kN	153,96 kN	128,94 kN

* MK – Metoda Komponent; SE – Scia Engineer

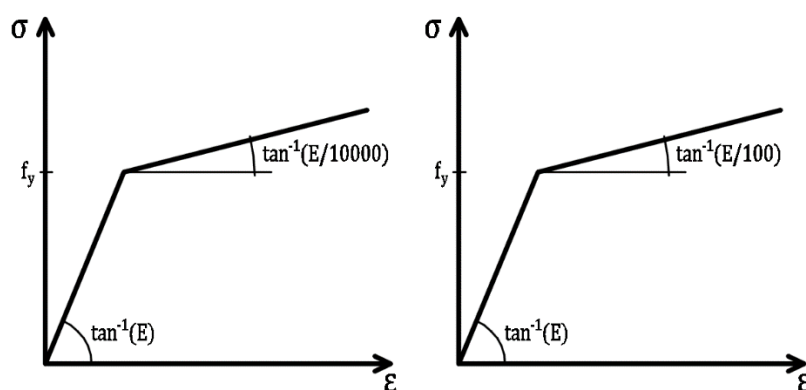
b) Pružno-plastický materiál

Další částí analýzy rámového rohu je změna materiálu ve skořepinovém modelu na pružno-plastický materiál bez zpevnění a se zpevněním. Při této analýze se vychází z normy [4], kde jsou dány podmínky pro návrh skrze metodu GMNA (geometricky a materiálově nelineární analýza), která spočívá v nelineární teorii velkých deformací a s nelineárním pružno-plastickým materiálem, bez imperfekcí. Při tomto návrhu lze pro kontrolu hlavních poměrných deformací na povrchu stěn použít doporučenou limitní hodnotu $\varepsilon \leq 0,05$. Tuto podmínku lze využít pro malé oblasti skořepiny, respektive rámového rohu. Pro omezení stěnové deformace se dle normy [4] doporučuje omezení její trvalé složky po dosažení podmínky plasticity následovně:

$$\varepsilon_{m,pl} = \frac{2}{\sqrt{3}} \sqrt{\left(\varepsilon_{x,pl}^2 + \varepsilon_{x,pl}\varepsilon_{y,pl} + \varepsilon_{y,pl}^2 + \frac{1}{4}\varepsilon_{xy,pl}^2 \right)} \leq 0,002$$

Z této rovnice je patrné, že je nutno dodržet podmínku poměrného plastického přetvoření na stěně nosníku na 0,2 %.

Zpevnění materiálu bylo uvažováno dle normy [4] nejprve na hodnotu 21 MPa, dle Obrázku 34 a). Z důvodu, že tato hodnota neměla prakticky žádný vliv na výsledné hodnoty, bylo zpevnění změněno na hodnotu 2100 MPa, podle Obrázku b).

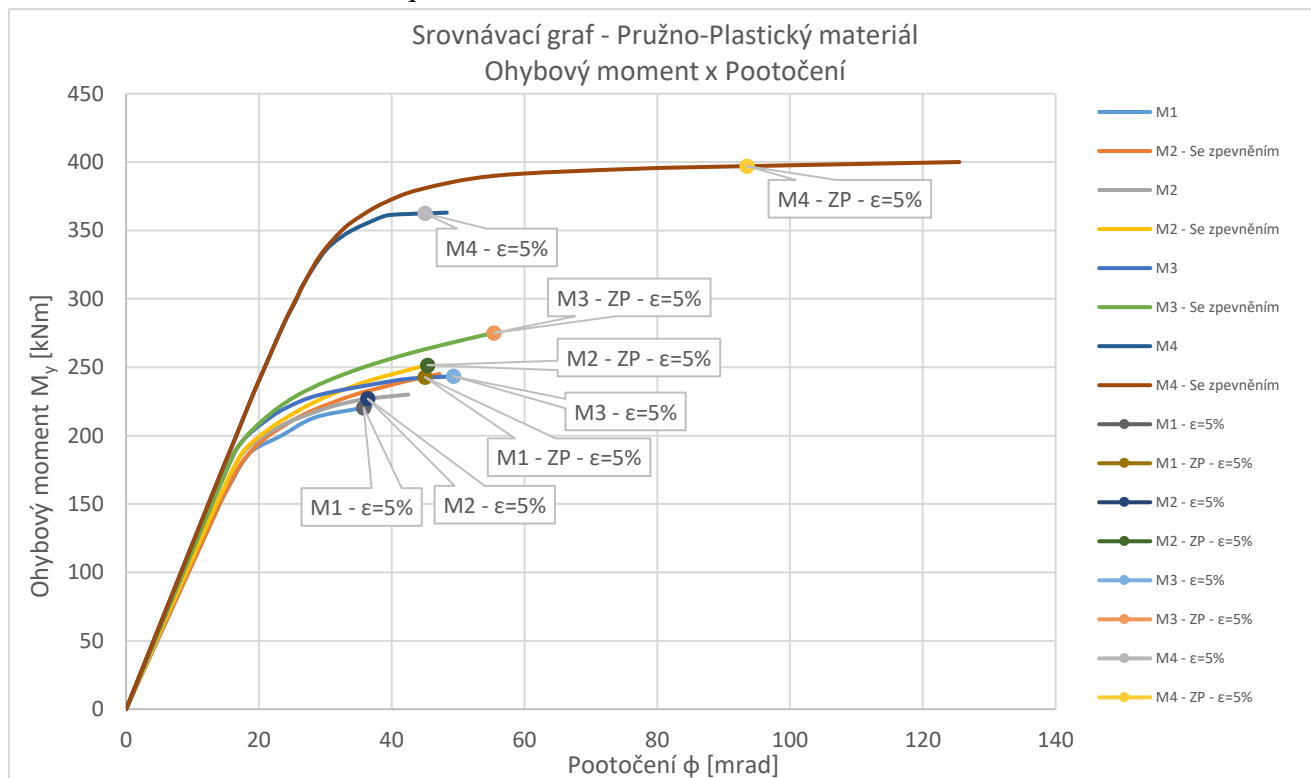


Obrázek 34 - Grafy zpevnění materiálu, a) s plató na mezi kluzu; b) s deformačním zpevněním

Pružno-plastická analýza se prováděla s vzrůstajícím zatížením, respektive ohybovým momentem na konci nosníku, kde obdobně jako u elastického materiálu se výsledná tuhost pro každý ohybový moment zjišťovala na prutovém modelu. Tímto se sledovala deformace a poměrné přetvoření rámového rohu. Tyto výpočty

DIPLOMOVÁ PRÁCE

se prováděly s výpočtovým nastavením na 30 přírůstků a 50 iterací pro malé ztížení, s rostoucím zatížením vzrůstala i výpočetní náročnost daného modelu, kde při cca $M = 220 \text{ kNm}$, bylo nutné zvýšit přírůstky na 170 a iterace na 180, tímto se extrémně zvyšovala doba a náročnost výpočtu. Výsledná data ze všech tří typu styčníků byla zpracována do grafu, kde je možné porovnat jednotlivé styčníky a vliv deformačního zpevnění.



* M – Model; ZP – Zpevnění (2100 MPa)

Graf 2 - Srovnávací graf - Pružno-Plastický materiál závislosti pootočení ϕ a ohybovým momentem

Na výše uvedeném grafu jsou zobrazeny křivky v závislosti pootočení na ohybovém momentu, kde je zřetelné, že deformační zpevnění má poměrně výrazný vliv na výslednou únosnost styčnicku, která je dána limitní hodnotu poměrného přetvoření $\varepsilon = 0,05$. Procentuální rozdíly jsou uvedeny níže v tabulce.

Tabulka 11 - Tabulka ohybové únosností styčnicku s pružno-plastickým materiálem

Typ styčnicku	M1	M1-ZP	M2	M2-ZP	M3	M3-ZP	M4	M4-ZP
Únosnost [kNm]	220,4	242,8	227,0	251,5	243,5	275,0	362,5	397
Rozdíl [%]	10,14		10,79		12,93		9,51	

* M – Model; ZP – Zpevnění (2100 MPa)

DIPLOMOVÁ PRÁCE

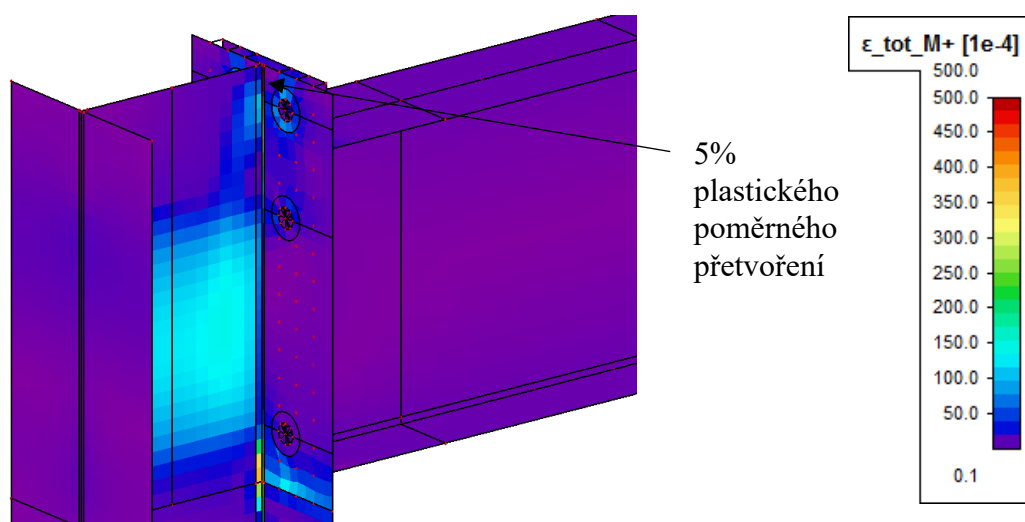
Z Tabulky 11 je patrné, že s využitím pružno-plastického materiálu se zpevněním 2100 MPa je nárůst únosnosti o 10-13 %.

i. Model 1 - Styčník bez výztuh

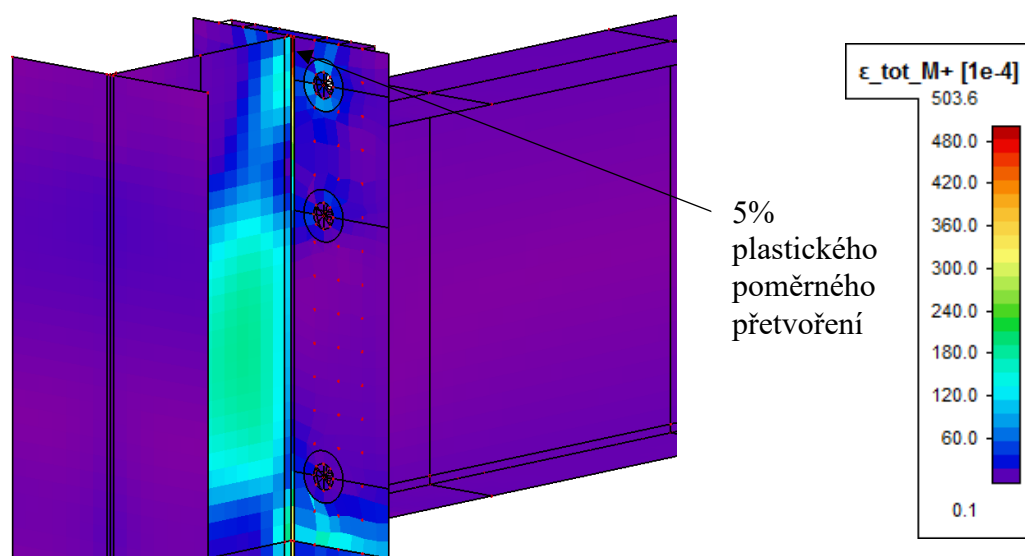
Tabulka 12 - Tabulka výsledných hodnot z pružno-plastické analýzy Modelu 1

BEZ ZPEVNĚNÍ				ZPEVNĚNÍ 2100 MPa			
M [kNm]	u_z [mm]	k_ϕ [MNm/rad]	$\epsilon_{tot,M}$ [%]	M [kNm]	u_z [mm]	k_ϕ [MNm/rad]	$\epsilon_{tot,M}$ [%]
150	27,363	89,8	0,691	150	27,327	90,7	0,664
160	29,410	85,31	0,821	160	29,335	86,800	0,781
170	31,550	80,22	1,013	170	31,423	82,28	0,909
180	33,982	72,4	2,280	180	33,767	75,15	1,097
190	37,864	54,88	1,648	190	37,239	59,38	1,372
200	44,227	36,5	2,197	200	42,367	39,07	1,723
210	54,204	23,29	3,103	210	49,277	30,231	2,160
215	61,555	18,254	3,692	218	53,407	25,605	2,406
220	73,076	13,504	4,917	220	58,380	21,745	2,704
220,15	73,201	13,478	4,923	230	70,767	15,683	3,618
220,25	73,486	13,91	4,953	240	88,029	11,286	4,743
220,395	73,923	13,259	5,000	242,75	93,862	10,502	5,000
221,0	75,822	12,715	5,255	245	98,934	9,601	5,276

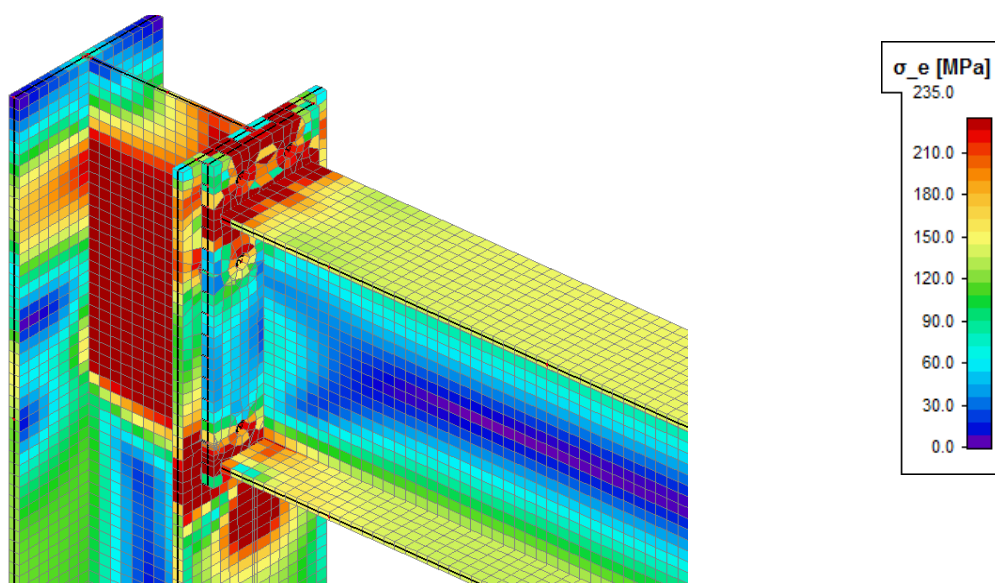
V porovnání s metodou komponent je v pružno-plastické analýze rámového rohu nárůst návrhového ohybového momentu o 16,67 % a pro materiál se zpevněním o 28,44 %. Jak už bylo zmíněno výše, tyto návrhové hodnoty byly vzaty dle poměrného přetvoření na hodnotě 5 % a na poměrném přetvoření stěny nosníku 0,2 %.



Obrázek 35 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 1 bez zpevnění

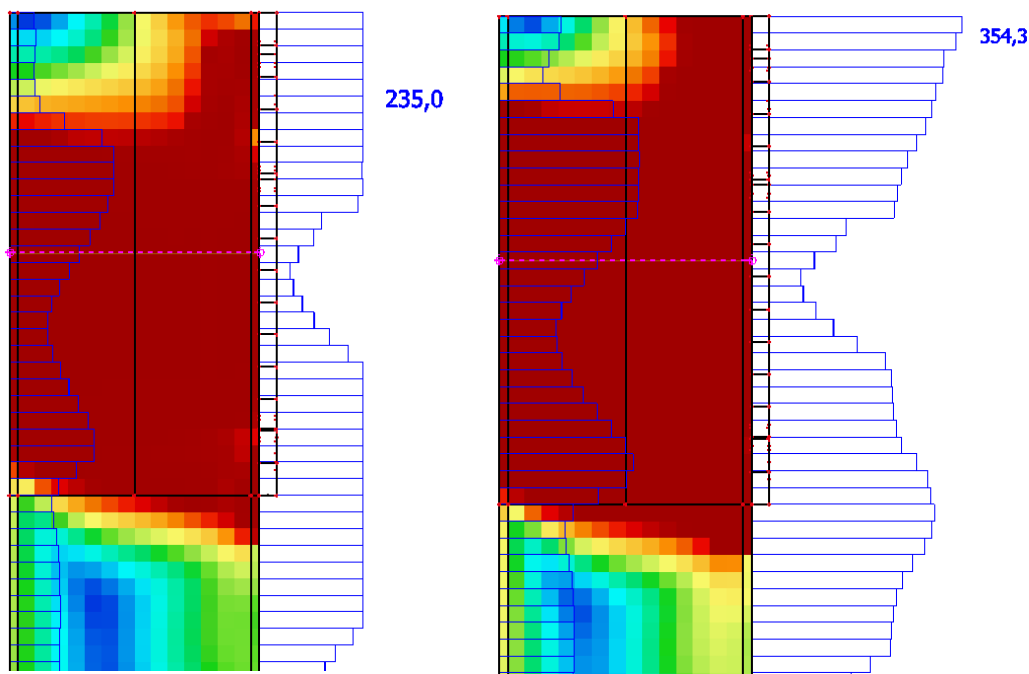


Obrázek 36 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 1 se zpevněním



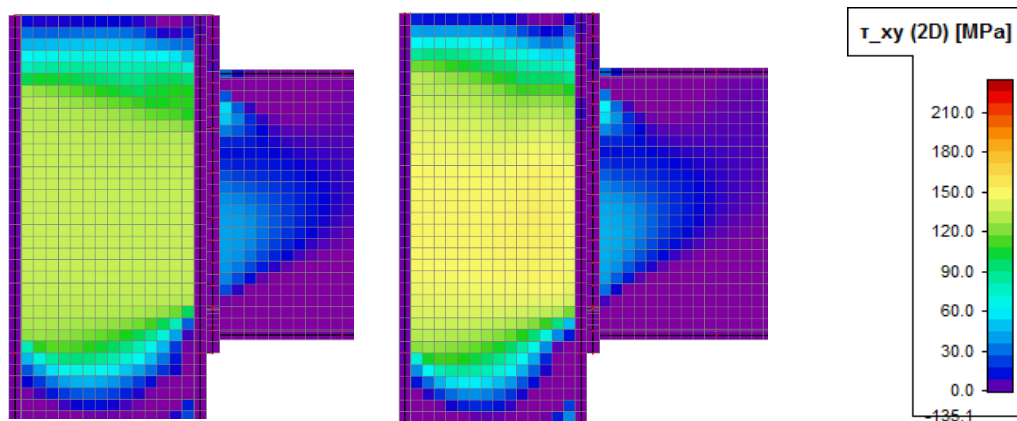
Obrázek 37 - Napětí na Modelu 1 při 5% přetvoření materiálu

Na obrázcích 35 a 36 je zřetelné, že největší poměrné přetvoření, kde materiál plastizuje je v okolí stěny sloupu a jeho pásnice, dále ve spoji mezi příclí a čelní deskou, což se srovnáním s obrázkem 37 vyplývá, že právě v těchto místech je dosažena mez kluzu.

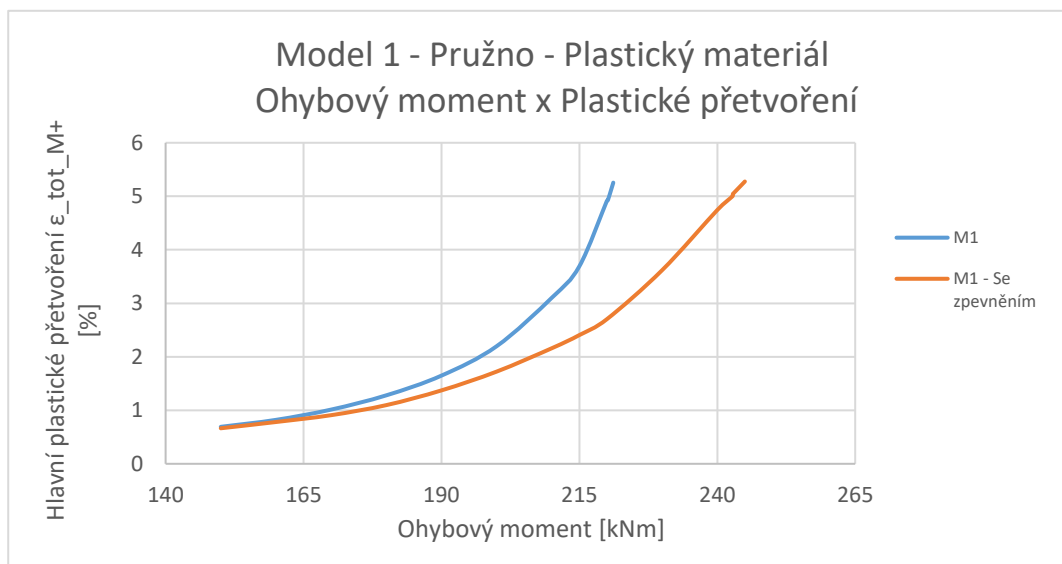


Obrázek 38 - Srovnání napětí v materiálu na Modelu 1 při 5% přetvoření a) bez zpevnění
b) se zpevněním

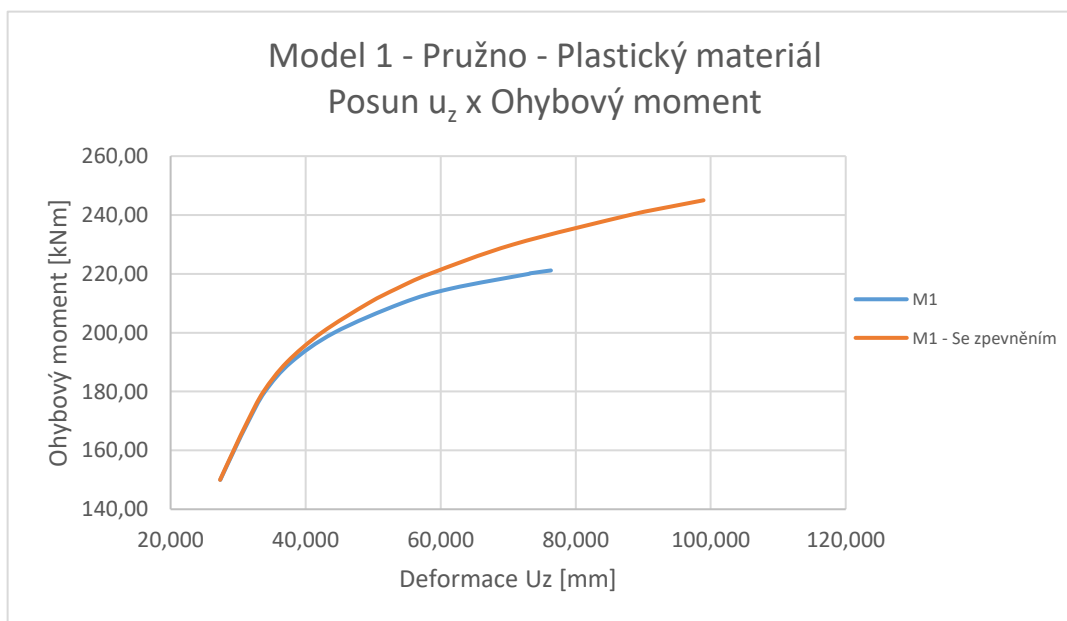
Na obrázku 38, je vytvořen řez na ploše, který znázorňuje hodnotu napětí, která je dosažena na modelu bez a se zpevněním. Mez kluzu pro první případ je dosažena mezi spodní a horní řadou šroubů na stěně sloupu dále na pásnici sloupu v oblasti šroubů. Pro druhý případ je dosaženo zvýšení napětí na mezi kluzu o 119,3 MPa při nastaveném zpevnění materiálu 2100 MPa.



Obrázek 39 - Smykové napětí τ_{xy} na Modelu 1 při 5% přetvoření a) bez zpevnění b) se zpevněním



Graf 3 - Graf závislosti plastického přetvoření ϵ a zatížení ohybovým momentem Modelu 1 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním



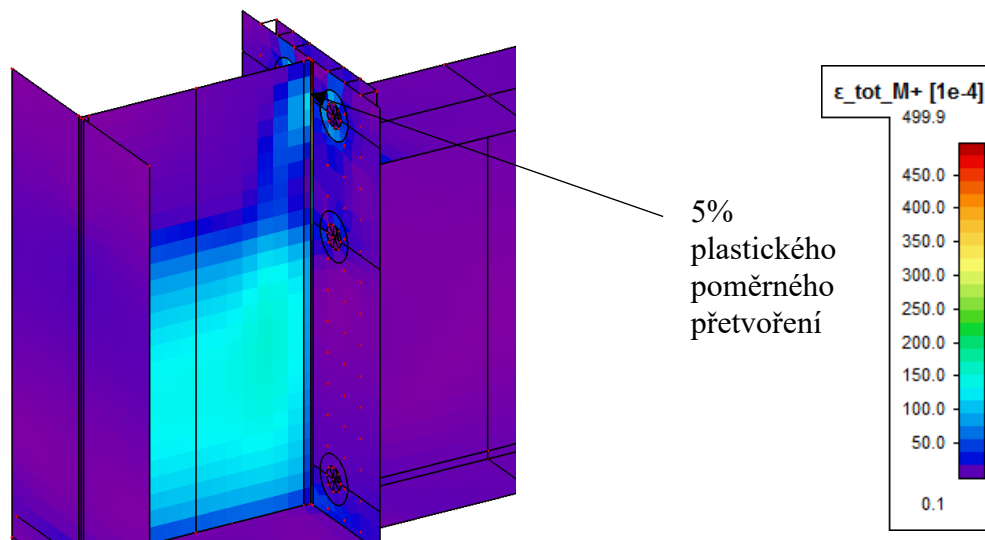
Graf 4 - Graf závislosti zatížení ohybovým momentem a deformací u_z Modelu 1 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním

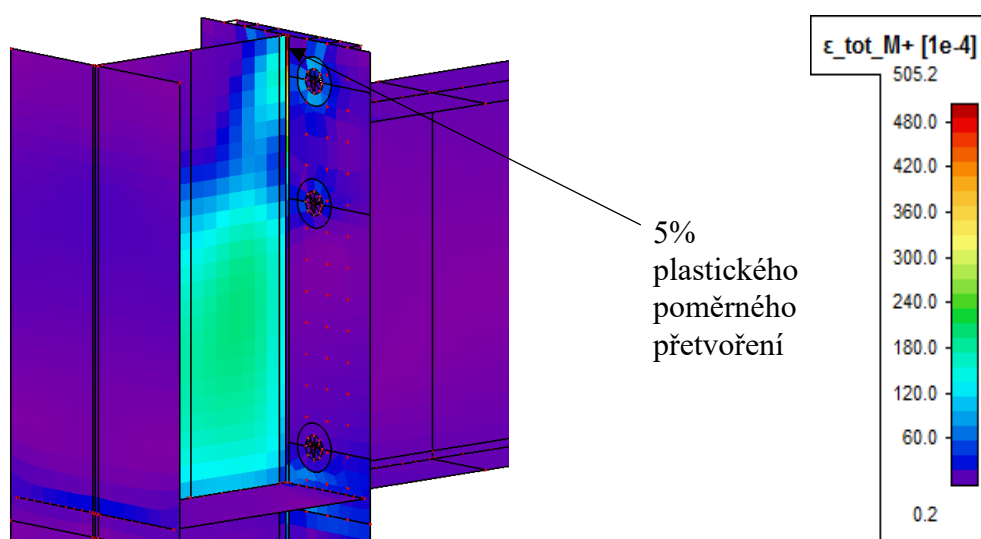
ii. Model 2 - Styčník s výztuhami v tlačené oblasti

Tabulka 13 - Tabulka výsledných hodnot z pružno-plastické analýzy Modelu 2

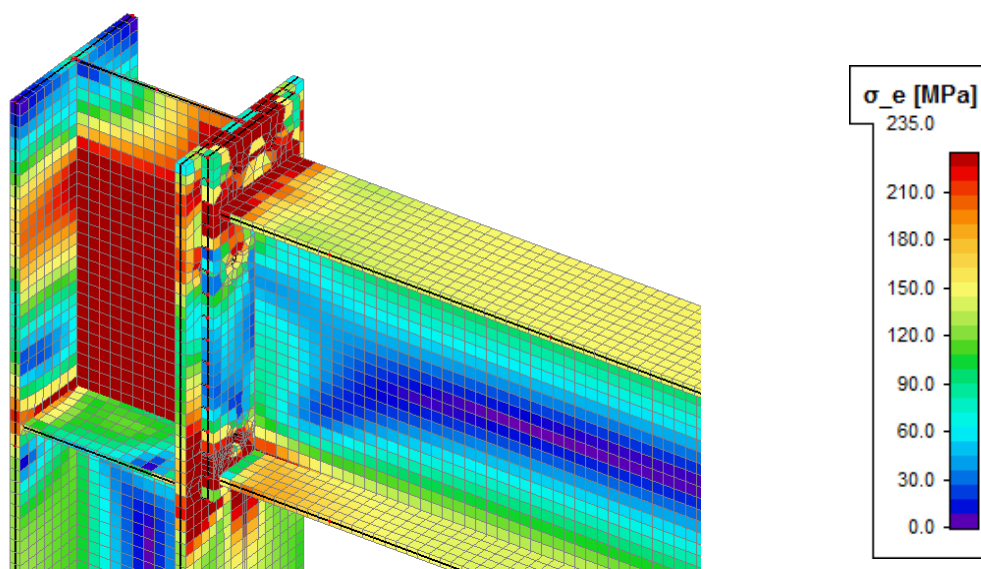
BEZ ZPEVNĚNÍ				ZPEVNĚNÍ 2100 MPa			
M [kNm]	u_z [mm]	k_φ [MNm/rad]	$\epsilon_{tot,M}$ [%]	M [kNm]	u_z [mm]	k_φ [MNm/rad]	$\epsilon_{tot,M}$ [%]
150	26,214	126,6	0,459	150	26,201	126,9	0,435
160	28,078	121,6	0,608	160	28,047	122,83	0,557
170	30,020	115,0	0,814	170	29,954	117,2	0,722
180	32,064	107,1	1,043	180	31,954	110,0	0,904
190	35,094	82,7	1,350	190	34,738	88,5	1,140
200	40,853	49,23	1,841	200	39,464	57,5	1,478
210	49,078	30,599	2,563	210	45,611	38,85	1,871
220	61,004	19,610	3,571	220	53,183	27,74	2,320
225	70,016	15,330	4,463	230	62,661	20,43	2,930
227	74,904	13,675	5,000	250	91,646	11,330	4,906
230	88,704	10,360	5,761	251,5	94,551	10,624	5,000

Pro tento typ styčníku bylo zjištěno, že návrhový moment je oproti ručnímu výpočtu snížen na o 6,66 %, kdežto pro materiál se zpevněním je patrný nárůst o 1,03 %.

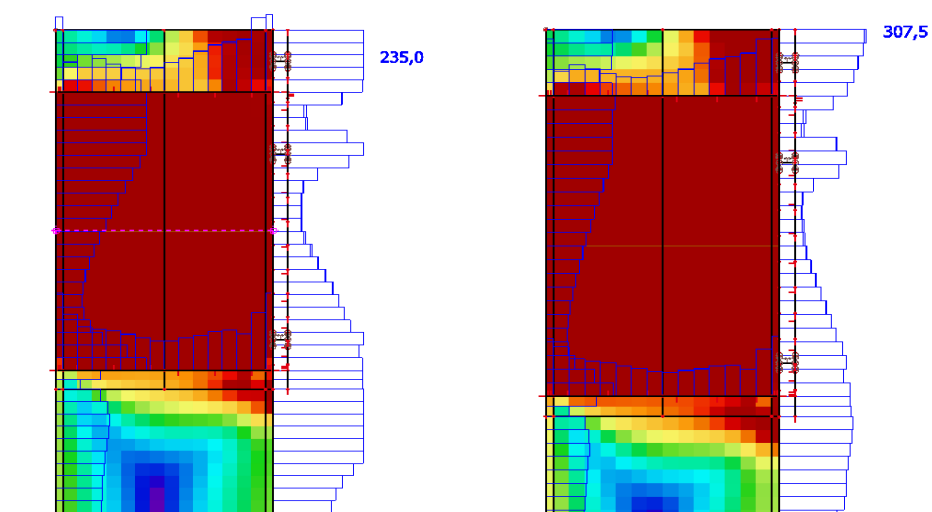
Obrázek 40 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 2 bez zpevnění



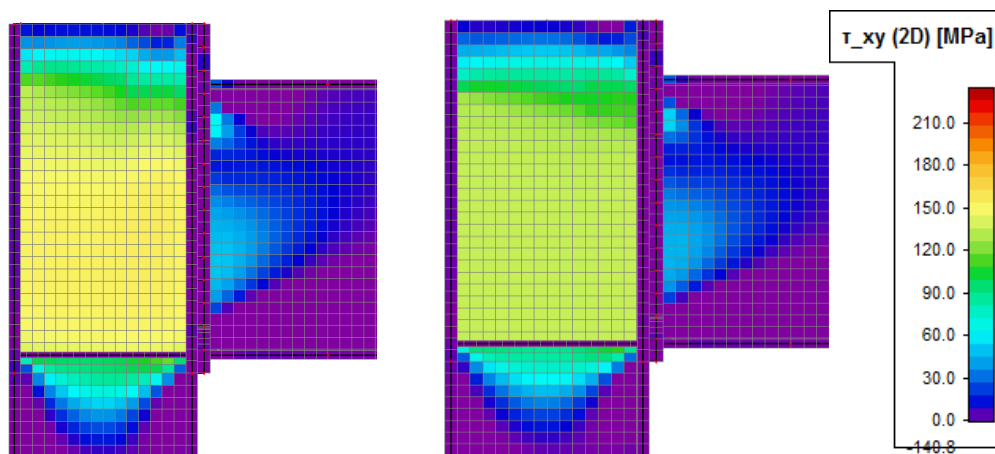
Obrázek 41 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 2 se zpevněním



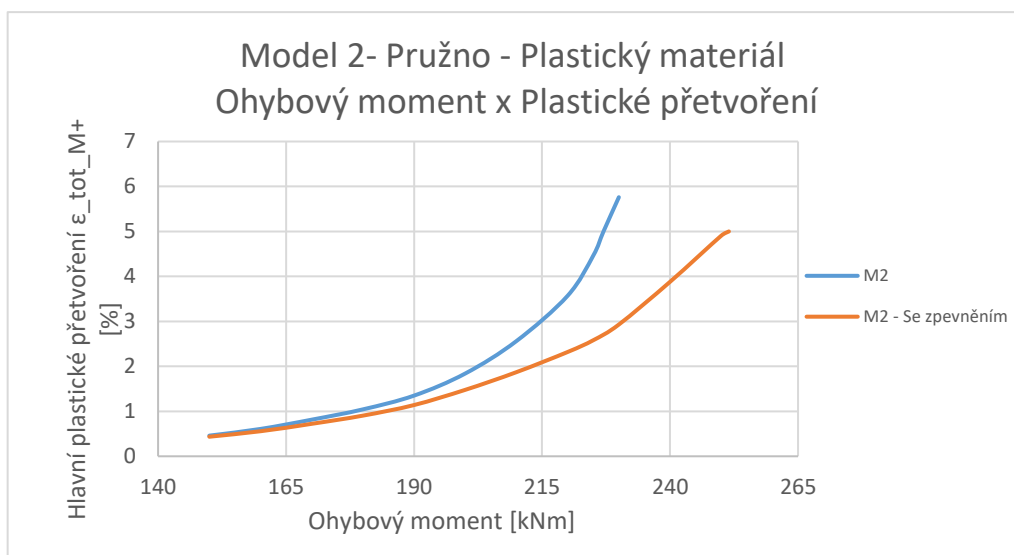
Obrázek 42 - Napětí na Modelu 2 při 5% přetvoření materiálu



Obrázek 43 - Srovnání napětí v materiálu na Modelu 2 při 5% přetvoření a) bez zpevnění
b) se zpevněním

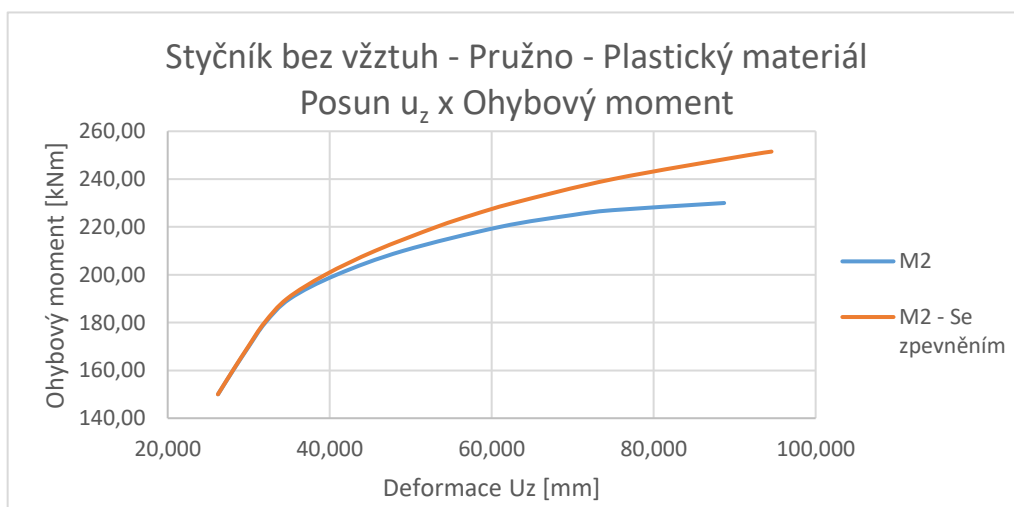


Obrázek 44 - Smykové napětí τ_{xy} na Modelu 2 při 5% přetvoření a) bez zpevnění
b) se zpevněním



* M – Model

Graf 5 - Graf závislosti plastického přetvoření ϵ a zatížení ohybovým momentem Modelu 2 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním



* M – Model

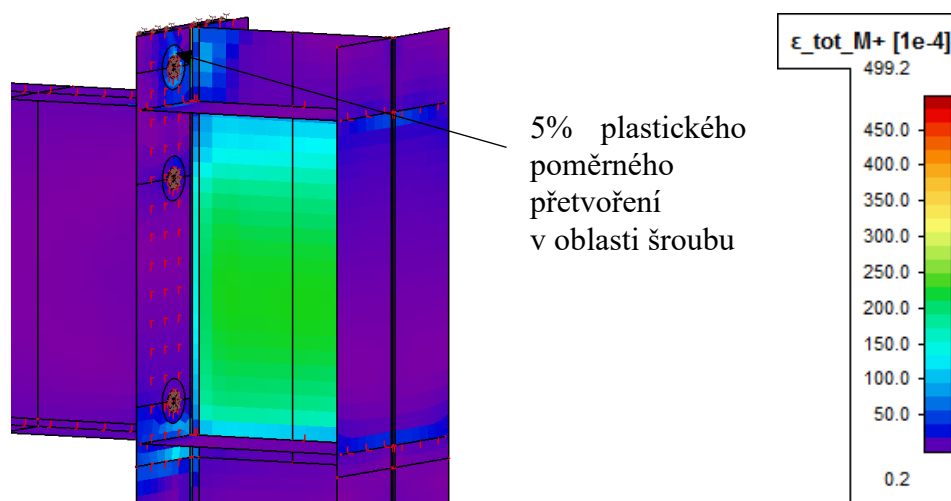
Graf 6 - Graf závislosti zatížení ohybovým momentem a deformací u_z Modelu 2 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním

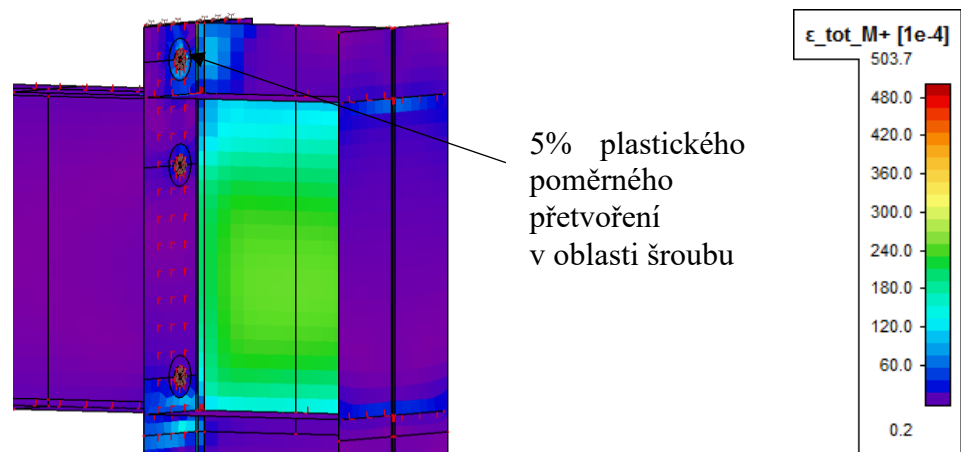
iii. Model 3 - Styčník s výztuhami u obou pásnic příčle

Tabulka 14 - Tabulka výsledných hodnot z pružno-plastické analýzy Modelu 3

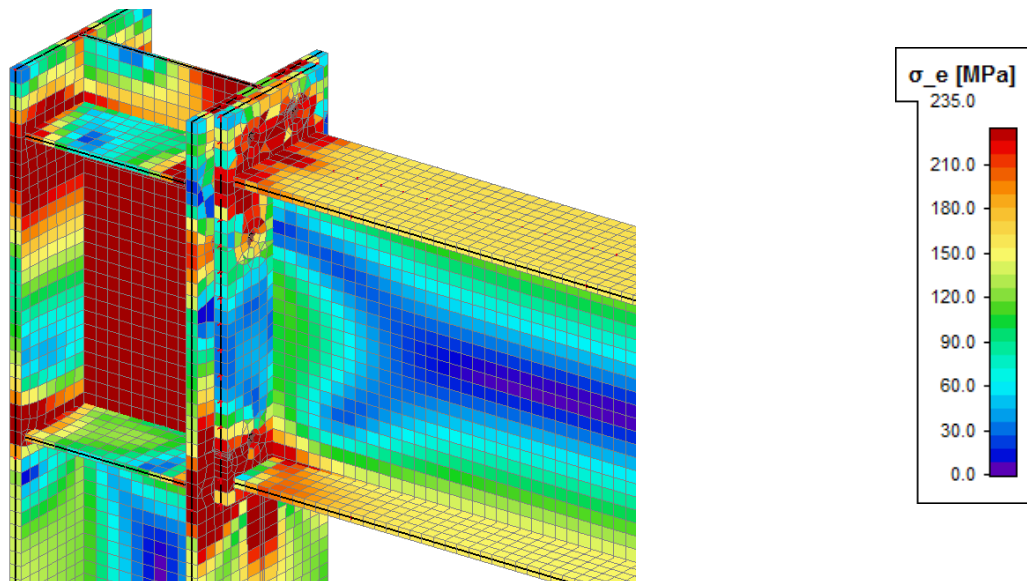
BEZ ZPEVNĚNÍ				ZPEVNĚNÍ 2100 MPa			
M [kNm]	u_z [mm]	k_φ [MNm/rad]	$\epsilon_{tot,M}$ [%]	M [kNm]	u_z [mm]	k_φ [MNm/rad]	$\epsilon_{tot,M}$ [%]
150	24,781	250	0,150	150	24,782	265,0	0,149
160	26,444	240	0,165	160	26,445	260,0	0,165
170	28,113	220	0,186	170	28,113	250,0	0,185
180	29,798	215	0,209	180	29,797	243,5	0,208
190	31,854	200	0,246	190	31,820	200	0,244
200	35,440	145	0,337	200	35,086	121,5	0,320
210	40,623	63,4	0,516	210	39,519	73,80	0,459
220	47,597	39,380	0,845	220	44,943	49,550	0,645
230	59,261	23,390	1,434	230	51,849	34,284	0,962
240	83,398	12,426	2,867	250	73,266	17,350	1,781
243,35	103,731	8,804	5,000	270	106,406	9,989	4,260
243,5	105,63	8,565	5,131	275	116,766	8,874	5,000

Z výsledků pro styčník s výztuhami v oblasti spodní a horní pásnice příčle vychází snížení návrhového ohybového momentu o 3,4 % a pro pružno-plastický materiál se zpevněním je jasný nárůst o 9,12 %.

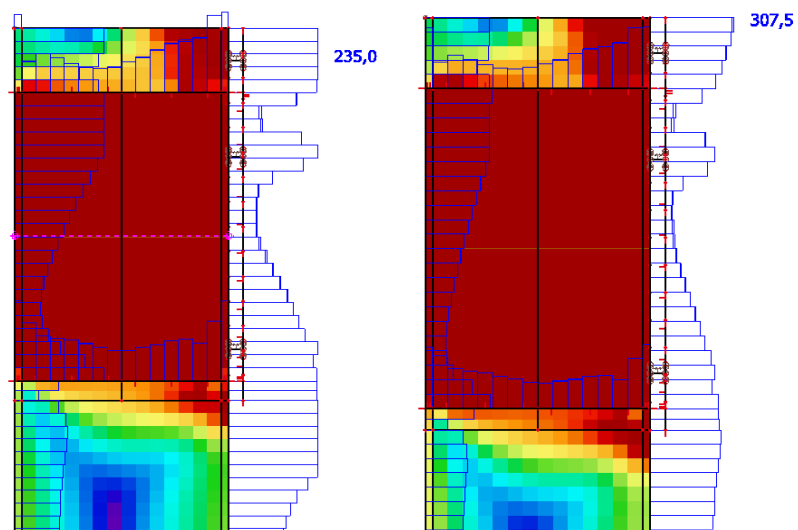
Obrázek 45 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 3 bez zpevnění



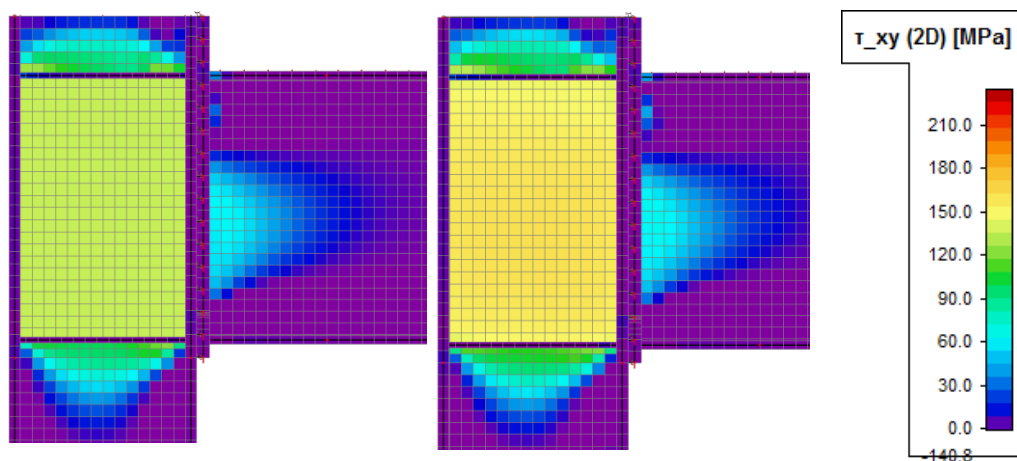
Obrázek 46 - Hlavní poměrné přetvoření $\varepsilon_{\text{tot_M}}$ Modelu 3 se zpevněním



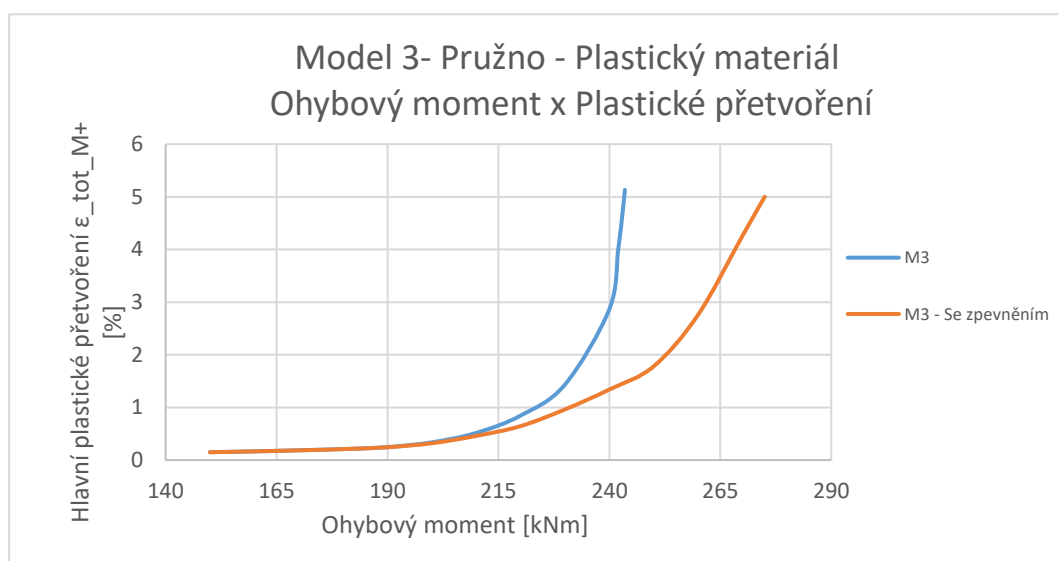
Obrázek 47 - Napětí na Modelu 3 při 5% přetvoření materiálu



Obrázek 48 - Srovnání napětí v materiálu na Modelu 3 při 5% přetvoření a) bez zpevnění
b) bez zpevnění

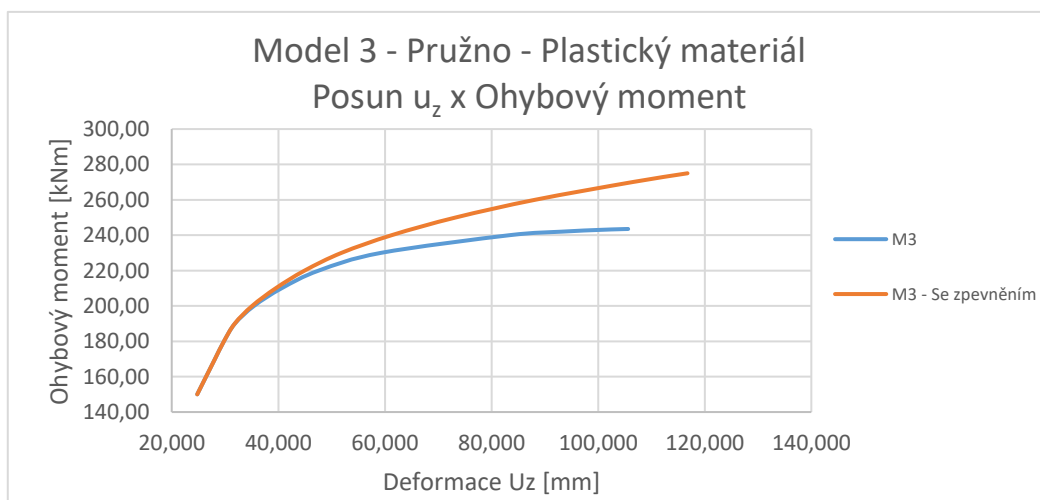


Obrázek 49 - Smykové napětí τ_{xy} na Modelu 3 při 5% přetvoření a) bez zpevnění b) se zpevněním



* M – Model

Graf 7 - Graf závislosti plastického přetvoření ϵ a zatížení ohybovým momentem Modelu 3 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním



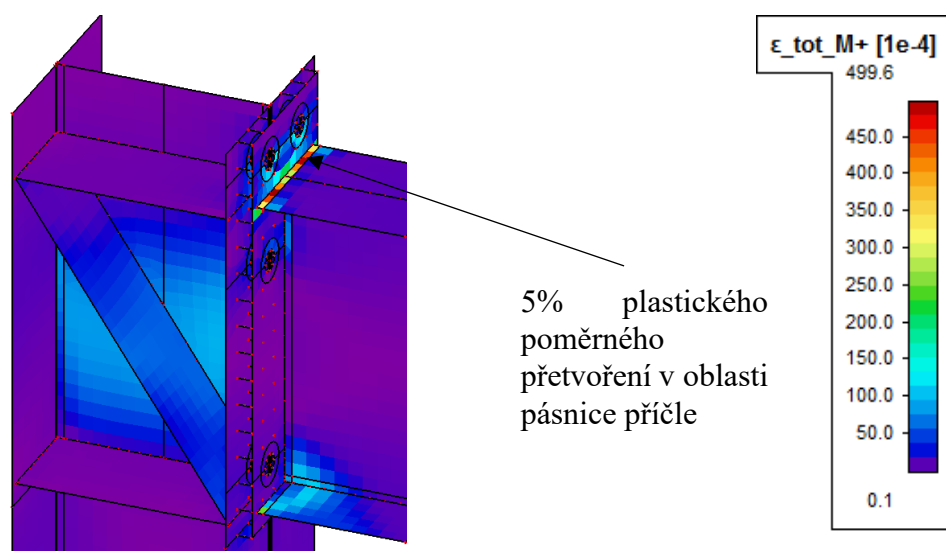
* M – Model

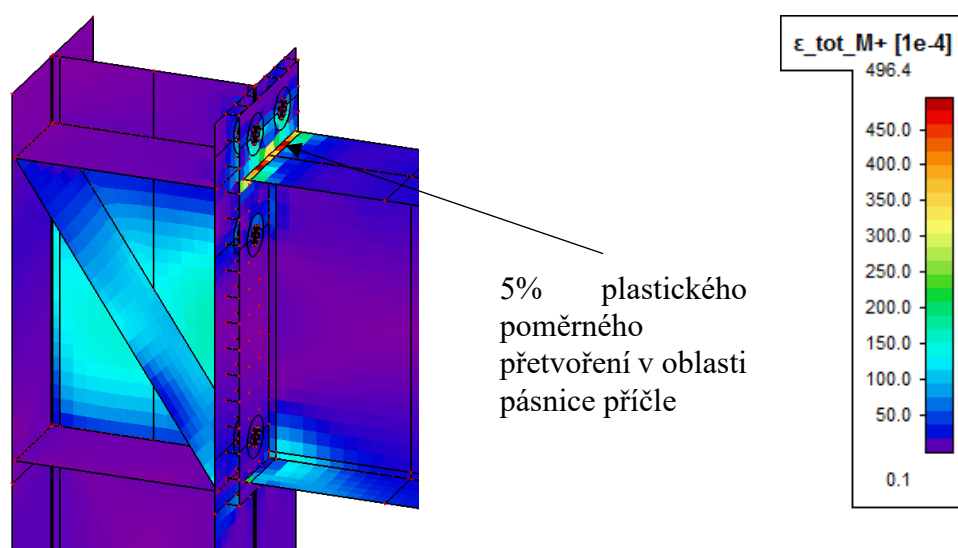
Graf 8 - Graf závislosti zatížení ohybovým momentem a deformací u_z Modelu 3 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním

iv. Model 4 - Styčník se smykovou výztuhou

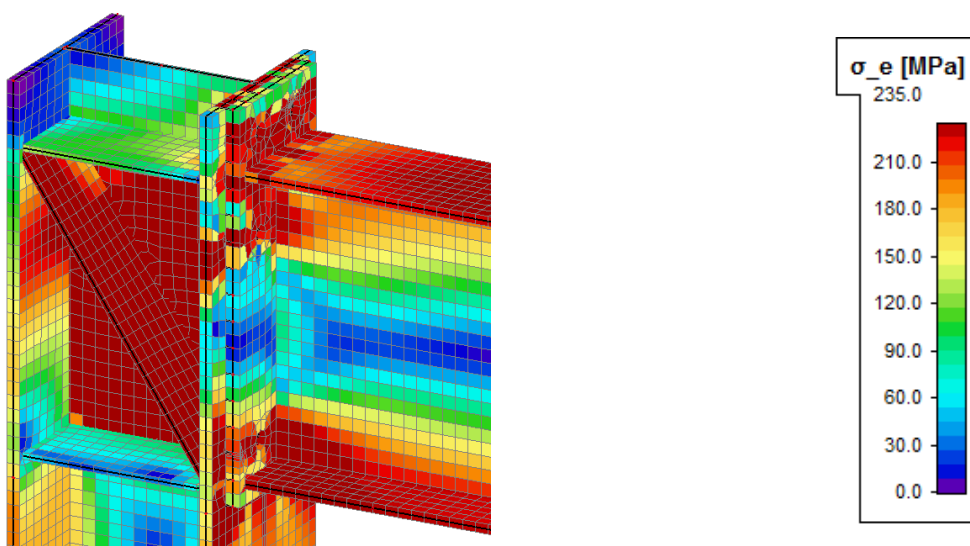
Tabulka 15 - Tabulka výsledných hodnot z pružno-plastické analýzy Modelu 4

BEZ ZPEVNĚNÍ				ZPEVNĚNÍ 2100 MPa			
M [kNm]	u_z [mm]	k_φ [MNm/rad]	$\epsilon_{tot,M}$ [%]	M [kNm]	u_z [mm]	k_φ [MNm/rad]	$\epsilon_{tot,M}$ [%]
150	23,569	507	0,147	150	23,569	510	0,139
200	32,523	456,39	0,238	200	31,521	470,55	0,236
230	36,404	420,79	0,342	230	36,396	430,36	0,335
280	42,077	400	0,686	280	45,014	403,1	0,628
300	49,099	310,27	0,975	300	48,945	315	0,856
330	56,238	165,88	1,699	350	62,947	101,32	1,939
350	66,434	69,86	2,978	370	76,13	49,89	2,956
360	77,365	40,08	4,505	380	86,575	33,15	3,588
361,5	79,024	38,05	4,736	390	101,03	23,25	4,300
362	79,86	37,14	4,861	395	111,033	18,98	4,731
362,5	80,761	35,57	5,00	397	117,358	17,126	5,000
363	81,757	34,52	5,146	400	125,365	15,13	5,425

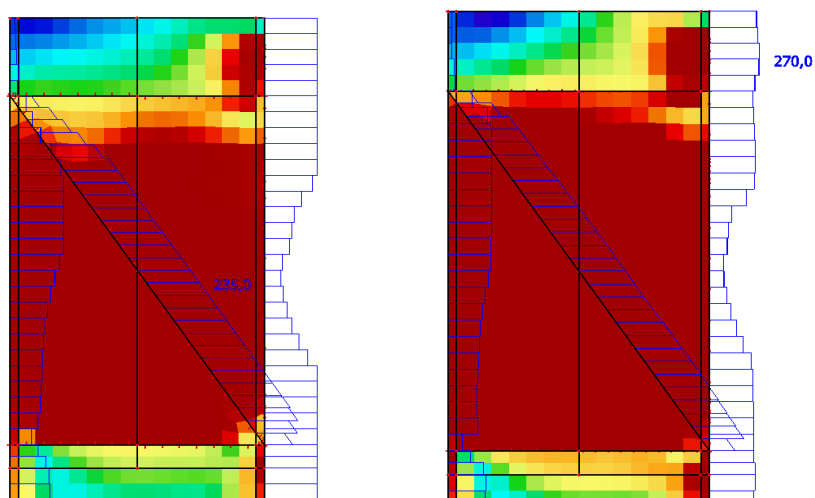
Obrázek 50 - Hlavní poměrné přetvoření $\epsilon_{tot,M}$ Modelu 4 bez zpevnění



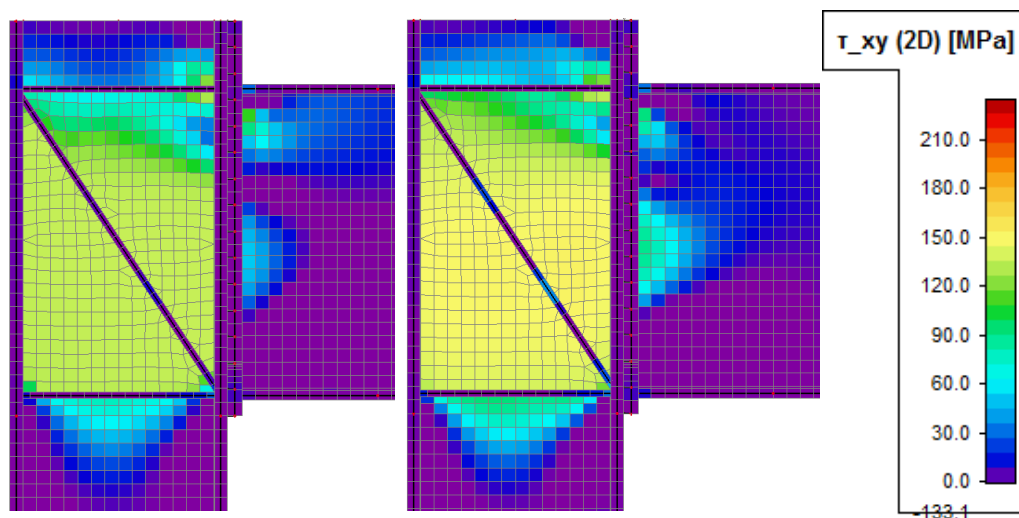
Obrázek 51 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 4 se zpevněním



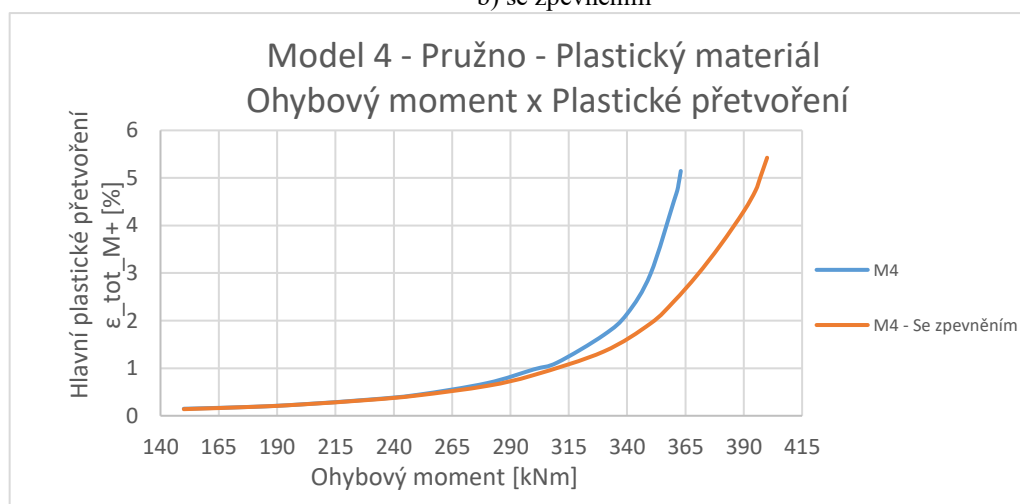
Obrázek 52 - Napětí na Modelu 3 při 5% přetvoření materiálu



Obrázek 53 - Srovnání napětí v materiálu na Modelu 3 při 5% přetvoření a) bez zpevnění
b) bez zpevnění

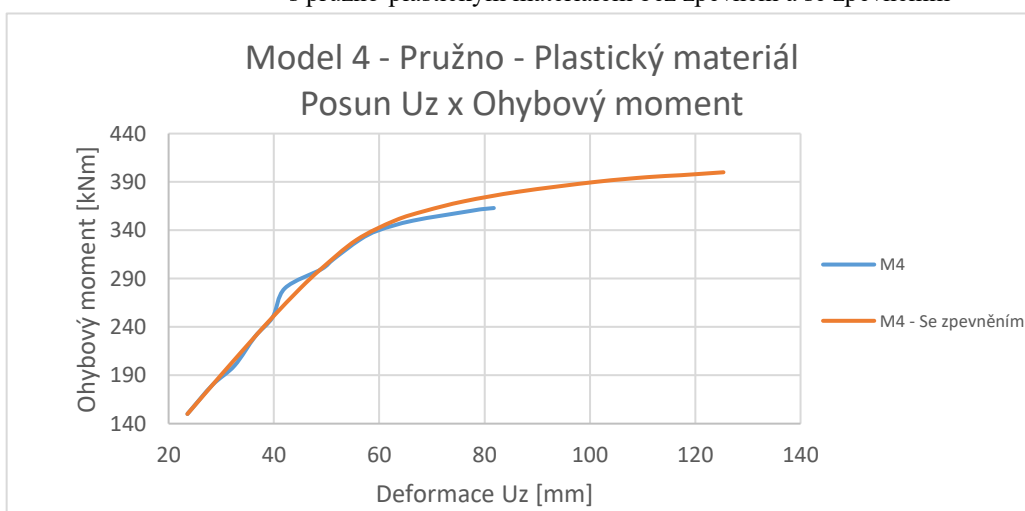


Obrázek 54 - Smykové napětí τ_{xy} na Modelu 4 při 5% přetvoření a) bez zpevnění
b) se zpevněním



* M – Model

Graf 9 - Graf závislosti plastického přetvoření ϵ a zatížení ohybovým momentem Modelu 4 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním



* M – Model

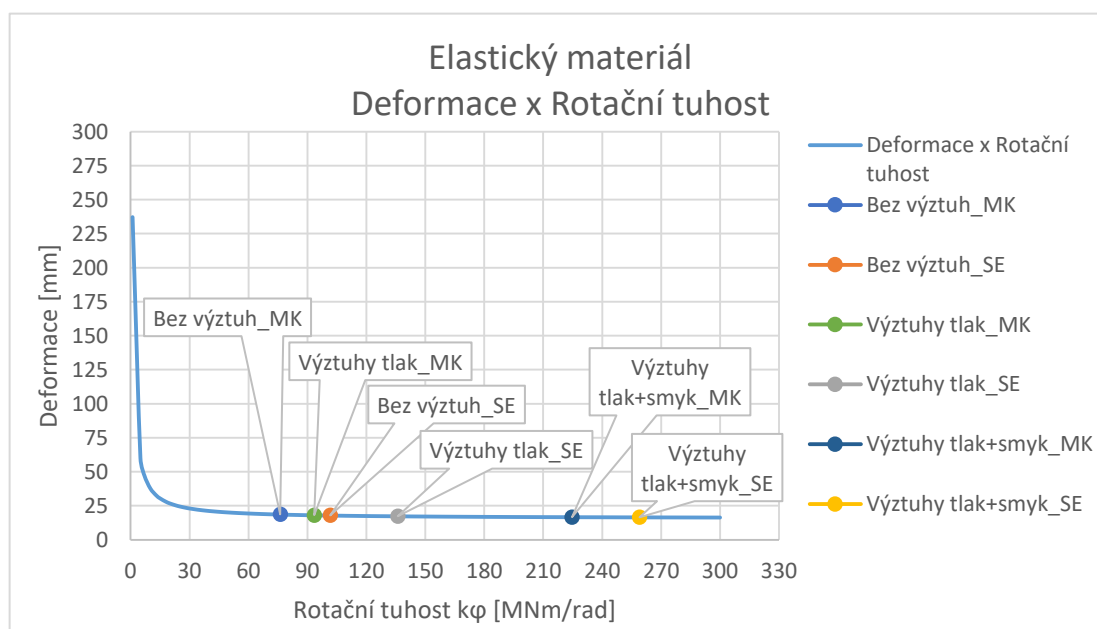
Graf 10 - Graf závislosti zatížení ohybovým momentem a deformací u_z Modelu 4 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním

5.4. Závěr analýzy rámového rohu

a) Elastický materiál

Výsledným hodnocením skořepinového modelu za využití elastického materiálu bylo srovnání s ručním výpočtem skrze metodu komponent. Skořepinový model byl vytvořen tak, aby výslednou tuhostí se co nejvíce blížil ručnímu výpočtu a nebyly ovlivňovány výsledky konstrukčním řešením modelu.

Výsledné hodnoty se lišily oproti ručnímu výpočtu pro styčník bez výztuh o 25,06 %, pro styčník s výztuhou v tlačené oblasti o 31,28 % a u styčníku s výztuhami v obou úrovních pásnice příčně o 13,26 %. Z těchto výsledků lze konstatovat, že skořepinový model je zhruba o 20-30 % tužší než výpočet z metody komponent. U styčníků s vysokou tuhostí už jsou rozdíly méně patrné.



* MK – Metoda Komponent; SE – Scia Engineer

Graf 11 - Elastický materiál, Deformace x Rotační tuhost

Z grafu 11 jsou výsledné hodnoty uvedeny v porovnání s metodou komponent (MK) a výpočtem pomocí Scia Engineer (SE). Tato křivka byla odvozena ze silové metody a byla zatížena ohybovým momentem $M = 100 \text{ kNm}$. Všechny vypočtené hodnoty jsou za kritickou oblastí.

b) Pružno – plastický materiál

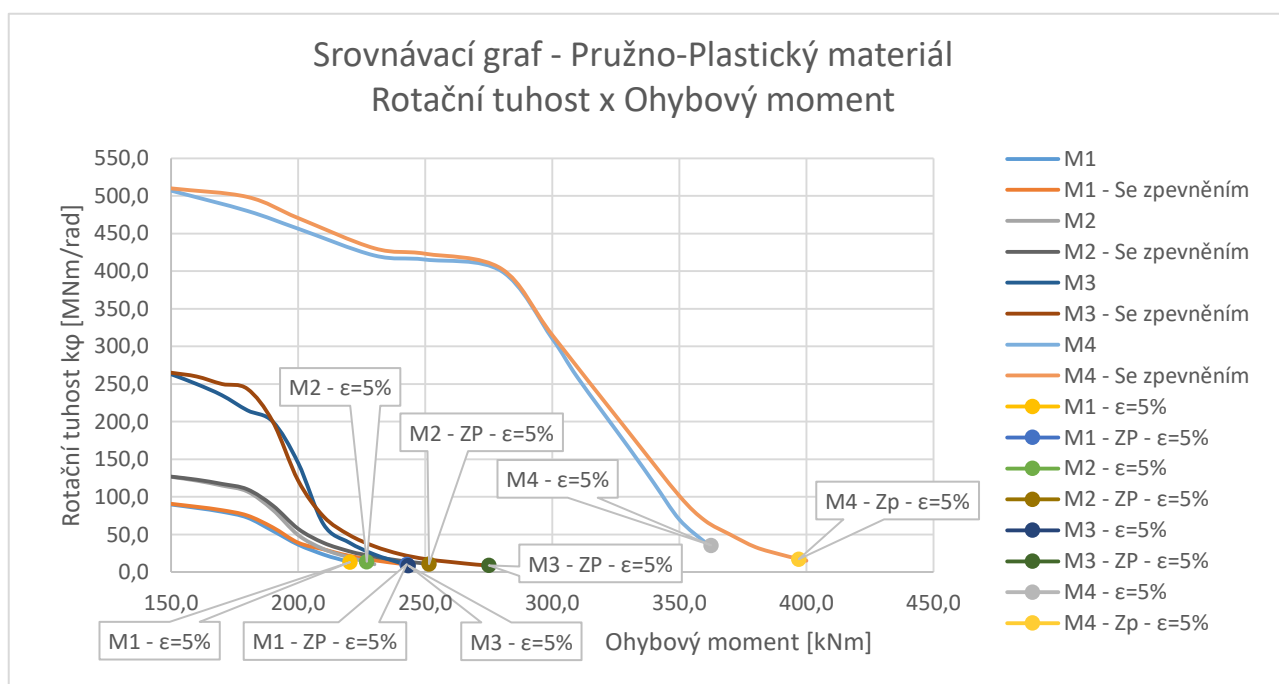
Analýza pružno-plastického materiálu spočívá v návrhu dle normy [5], kde jsou dány podmínky pro poměrné přetvoření viz výše kap. 5.3.b, konkrétně metodou GMNA. Dále byly pozorovány napětí na styčnicích bez zpevnění a se zpevněním o hodnotě 2100 MPa.

Pro první styčník bez zpevnění je výsledný návrhový ohybový moment $M_{Rd,1,BZP} = 220,392 \text{ kNm}$ s tuhostí styčníku $k_{\phi,1,BZP} = 13,259 \text{ MNm/rad}$. Pro styčník se zpevněním jsou hodnoty následující: $M_{Rd,1,ZP} = 242,75 \text{ kNm}$ a $k_{\phi,1,ZP} = 10,502 \text{ MNm/rad}$.

Styčník s výztuhami v tlačené oblasti bez zpevnění má návrhový ohybový moment $M_{Rd,2,BZP} = 227,0 \text{ kNm}$ s tuhostí $k_{\phi,2,BZP} = 13,675 \text{ MNm/rad}$. Za využití zpevnění $M_{Rd,2,ZP} = 251,5 \text{ kNm}$, $k_{\phi,2,ZP} = 10,624 \text{ MNm/rad}$.

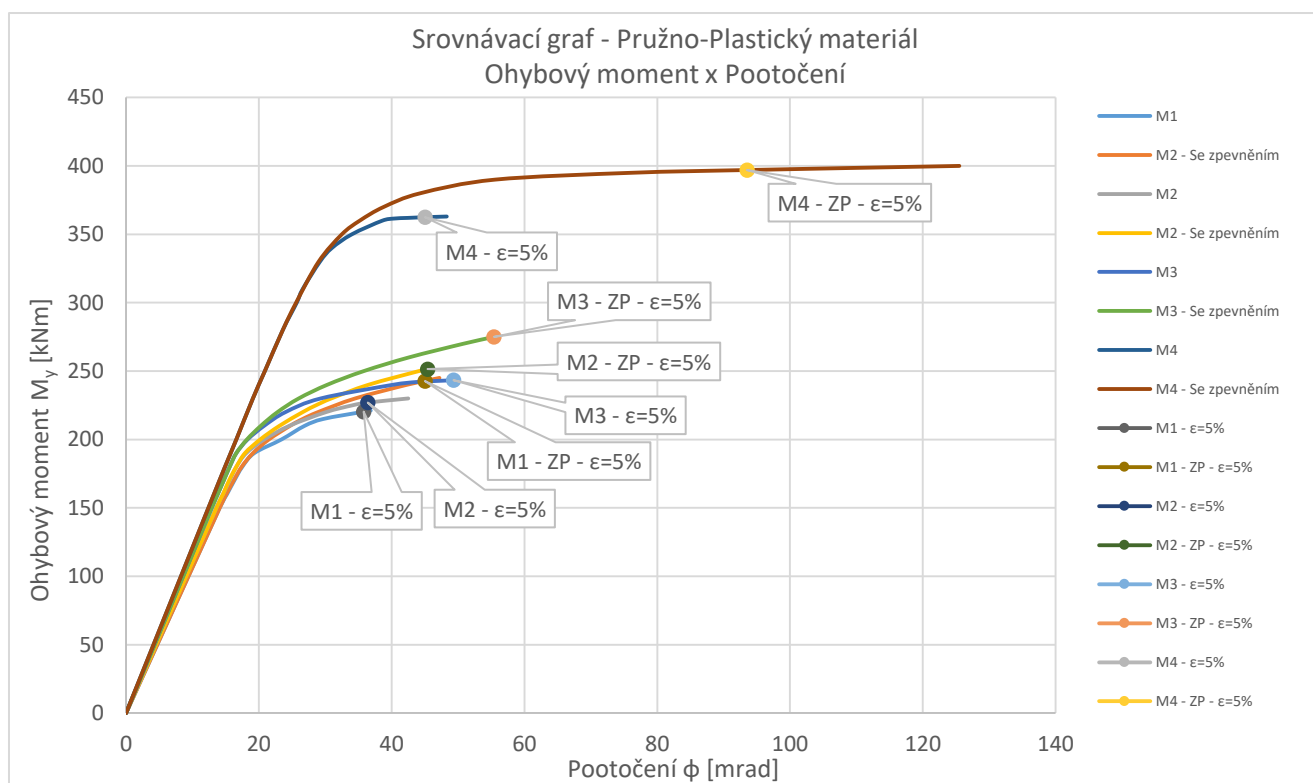
Styčník s výztuhami v tlačené a smykové oblasti má výsledný ohybový moment, při kterém dochází k 5% přetvoření $M_{Rd,3,BZP} = 243,35 \text{ kNm}$ a tuhost $k_{\phi,3,BZP} = 8,804 \text{ MNm/rad}$ se započítání zpevnění materiálu dochází k nárůstu hodnot na $M_{Rd,3,ZP} = 275,0 \text{ kNm}$, $k_{\phi,3,ZP} = 8,874 \text{ MNm/rad}$.

Dále je níže uveden graf pro srovnání všech styčníků při pružno-plastické analýze, ze kterého vyplývá, že numerické výpočty s deformačním zpevněním mají poměrně výrazný vliv na únosnost jednotlivých styčníků.



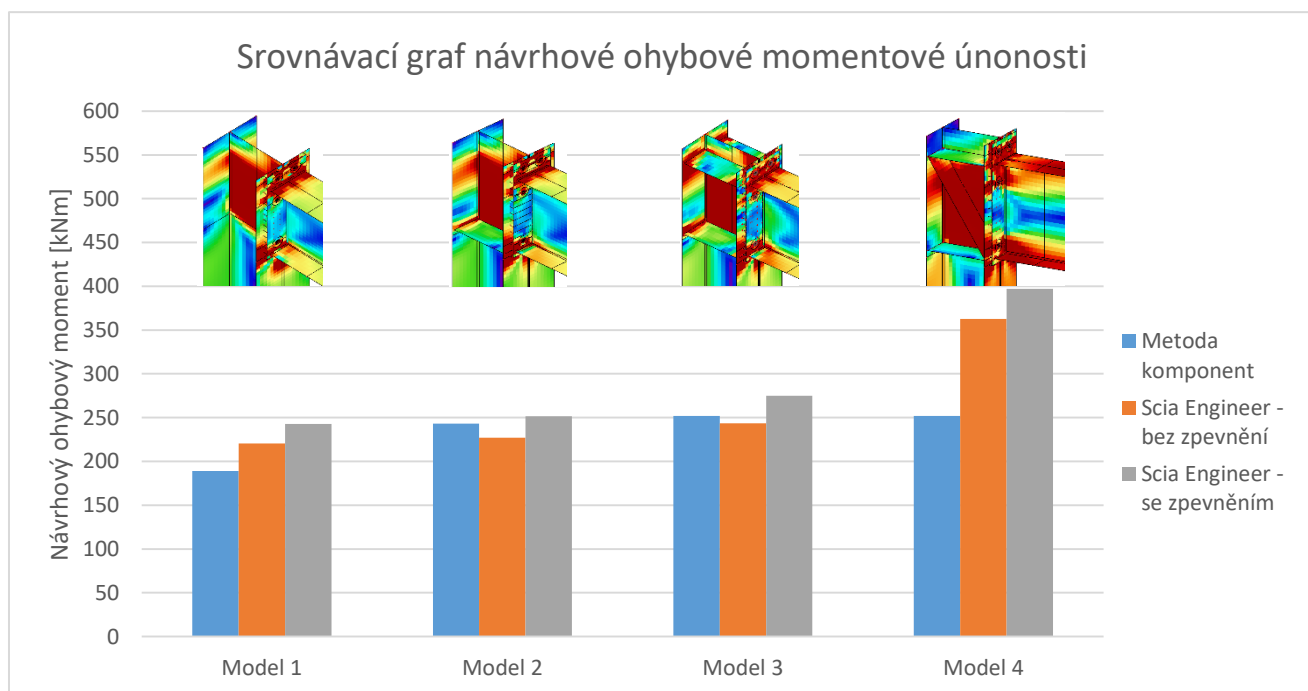
* M – Model; ZP – Zpevnění; ϵ – Poměrné plastické přetvoření

Graf 12 - Srovnávací graf závislosti rotační plastické tuhosti k_{ϕ} a zatížení ohybovým momentem

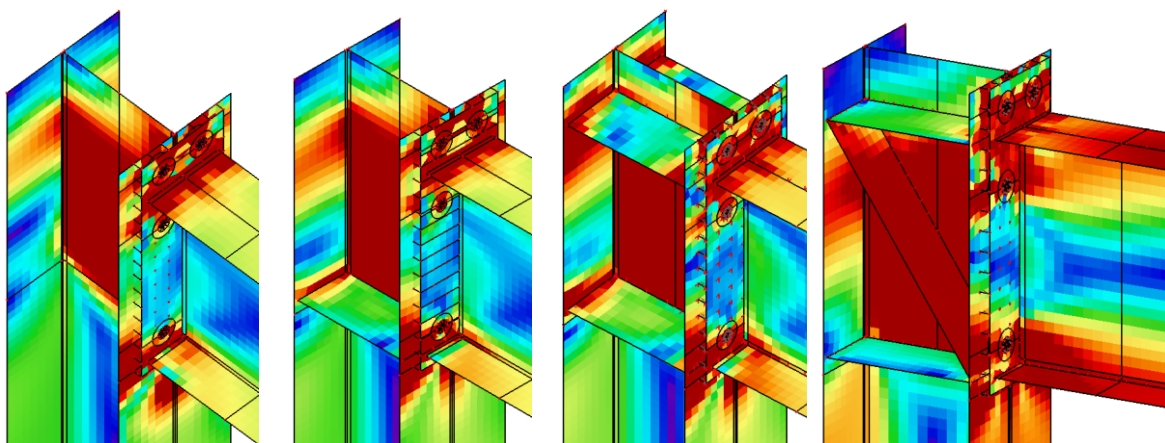


* M – Model; ZP – Zpevnění (2100 MPa)

Graf 13 - Srovnávací graf - Pružno-Plastický materiál v závislosti pootočení ϕ a ohybovým momentem



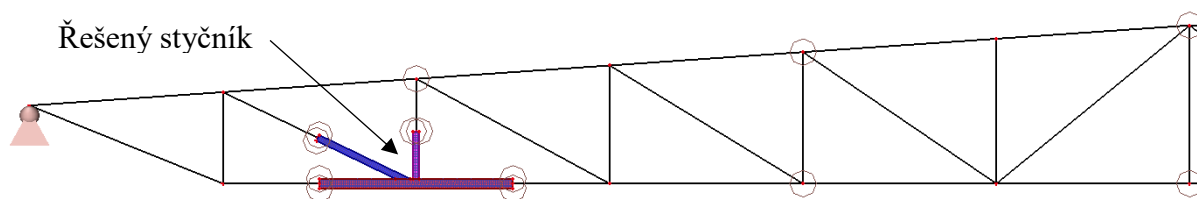
Graf 14 - Srovnávací graf návrhového ohybového momentu dle jednotlivých metod návrhu styčnicku



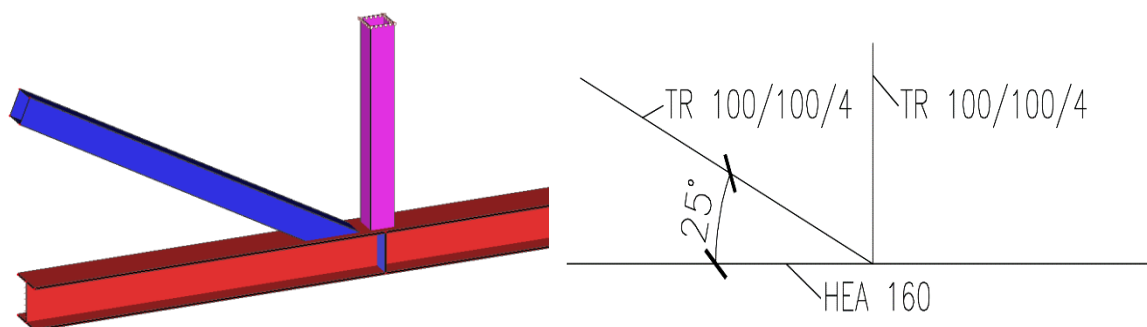
Obrázek 55 - Srovnání průběhu napětí pružno-plastického materiálu na jednotlivých modelech

6. Analýza příhradového svařovaného N styčnicku

V této kapitole je řešena analýza numerického modelu svařovaného příhradového N styčnicku tvořeného spodním pásem z ocelového válcovaného profilu HEA160 a mezipásovými pruty RHS TR 100/100/4. Jak v předchozí kapitole, tak i v této je numerický model nejprve vytvořen pomocí ploch v programu AutoCad následně importován do programu SciaEngineer, kde je model převeden na skořepiny.



Obrázek 56 - Řešený příhradový nosník tvořen z prutů a styčník vytvořen ze skořepin



Obrázek 57 - Detail řešeného styčníku

Tento styčník byl vybrán z důvodu, že nelze použít klasické normové postupy pro návrh styčníku, jelikož nesplňuje základní podmínky pro rozsah použití dané normou [6], konkrétně jsou to tyto:

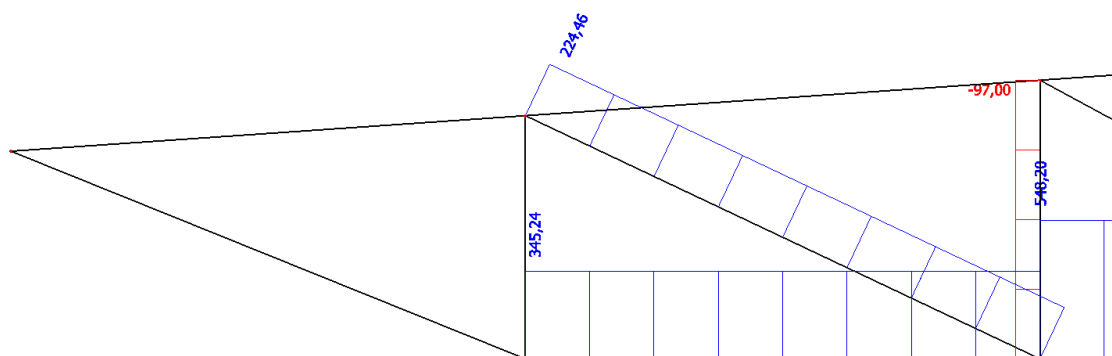
- úhel mezi pásy a mezipásovými pruty musí splňovat podmínku $\theta \geq 30^\circ$,
- konce prutů stýkající se ve styčníku musí být upraveny tak, aby se tvar jejich příčného řezu nezměnil.

6.1. Tvorba numerického modelu N styčníku

Jakmile byl model vytvořený z ploch a byl importován do programu Scia Engineer, bylo nutné přidělit jednotlivým skořepinám tloušťky materiálu, aby odpovídali tloušťkám jednotlivých profilů.

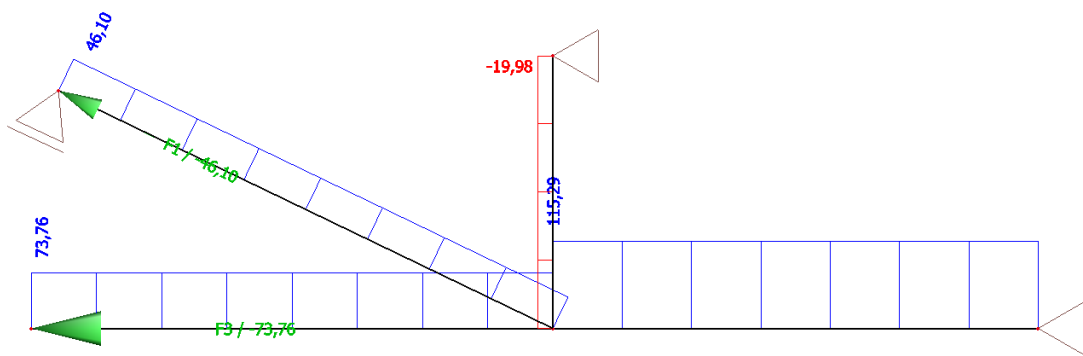
V první části analýzy příhradového styčníku je uvažováno se styčníkem v rámci celé příhradové konstrukce z důvodu snadnějšího řešení okrajových podmínek, které v této konstrukci budou tvořeny podpory pro příhradovou konstrukci. Dále je uvažováno v úrovni horního pásu s podporami kolmo na rovinu ohybu pro zajištění stability ocelové konstrukce, kde by mohlo dojít k přerušení analýzy z důvodu ztráty stability konstrukce.

Dalším modelem pro analýzu bude samostatný N styčník, bez příhradové konstrukce. Toto řešení si vyžádá složitější řešení okrajových podmínek, aby bylo ve styčníku dosaženo tahových sil podobných těm, které vznikaly na prutovém modelu. Prutový model byl vytvořen právě k zjištění poměru sil na diagonále a spodním pásu.



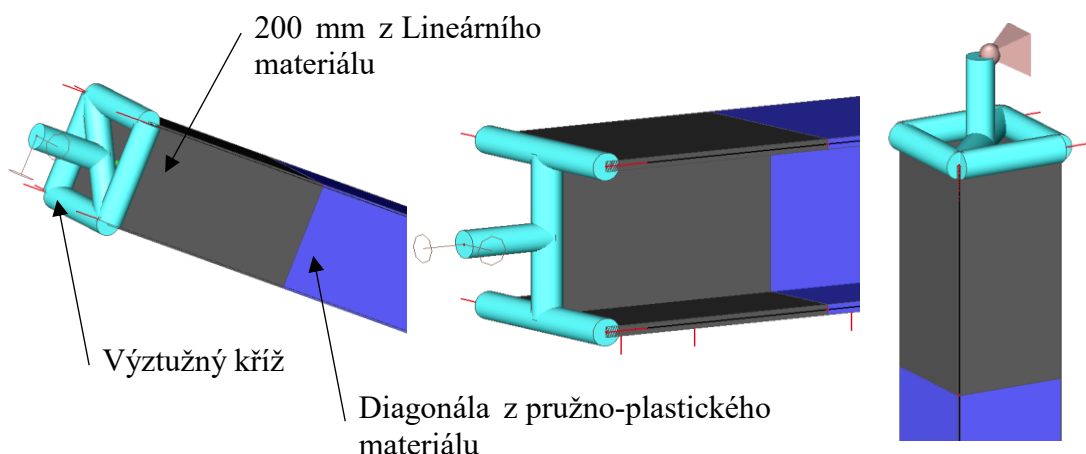
Obrázek 58 - Vnitřní síly na prutové příhradové konstrukci

Na základě těchto sil a poměru mezi nimi, byl vytvořen zjednodušený prutový model N styčníku a podpory jsou na něm vyřešeny tak, aby se co nejlépe přiblížili právě těmto silám z příhradové konstrukce v daném poměru.



Obrázek 59 - Řešení okrajových podmínek pro numerický model N styčníku

Na skořepinovém modelu byly podpory zadány uzlově na pruty, které jsou vytaženy z daného prvku buď přes kříž z ideálních prutů, nebo osově na spodní pás viz Obrázek 60. Podpory jsou stejné, jako jsou na Obrázku 59.



Obrázek 60 - Okrajové podmínky skořepinového modelu a) posuvná podpora diagonály b) posuvná podpora v ose z spodního pásu c) neposuvná podpora svislice

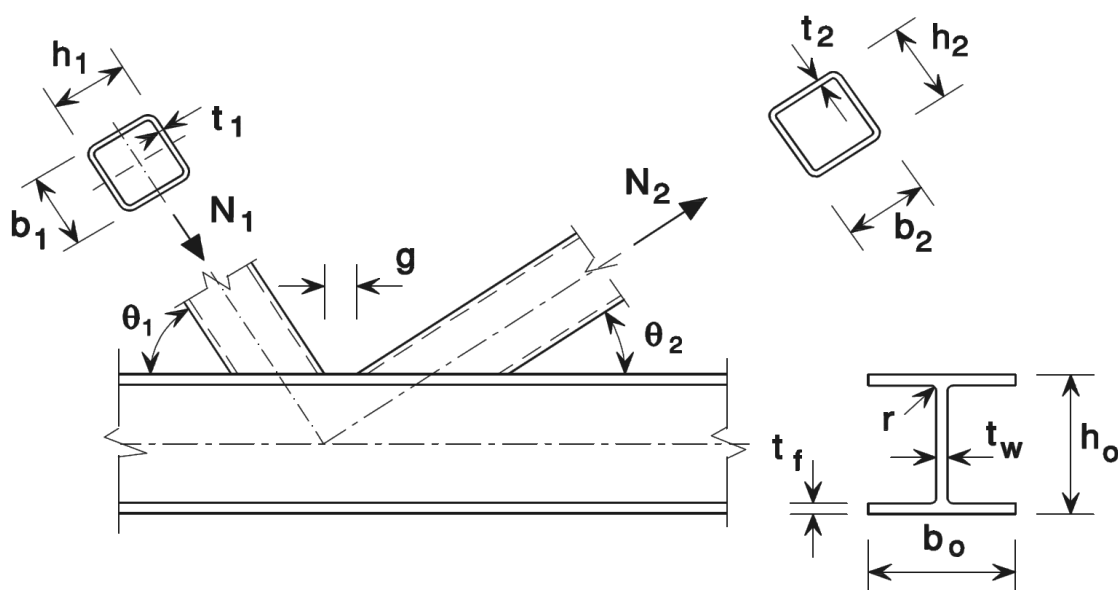
Kříž, který lze vidět na obrázku 60a) je uchycen do rohů profilu RHS TR, z důvodu, vložení síly doprostřed kříže. Je nutné obvod profilu vyztužit, aby nedošlo ke zkreslení výsledků napětí a ke vzniku numerických špiček napětí. Dalším prvkem, který eliminuje špičky napětí, jsou plochy vytaženy o 200 mm pro každý řešený prvek a byl jim přidělen lineární materiál viz Obrázek 60. Obvod byl vyztužen stejnými prvky, které jsou použity na kříž a to kruhovou tyčí o průměru 200 mm, kde byl zvýšen modul pružnosti v tahu a tlaku o dva řády a snížena hmotnost o dva řády.

Zatížení, jak už bylo zmíněno výše, je použito vodorovné v ose diagonály a spodního pásu, které bylo postupně navyšováno obdobně jak u rámového rohu.

6.2. Výpočet únosnosti prvků dle normových vztahů

I když podmínky dané normou [6] řešený styčník nesplňuje, je možné vypočítat návrhové síly ke zjištění nejslabšího prvku styčníku a následně výsledky porovnat s numerickým modelem.

Problémem návrhu dle normy [6] je, že vztahy dané normou nijak nezohledňují síly či napětí, které vznikají v sousedních prvcích, tedy u řešeného modelu to je svislice a spodní a horní pás příhradové konstrukce.



Obrázek 61 - N a K styčník dle normy [6]

a) Podmínky pro posouzení mezipásového prutu

$$\gamma = \frac{b_0}{t_f} = \frac{160}{9} = 8,89$$

$$\beta \leq 1,0 - 0,03\gamma = 0,7333 \dots \dots \text{konzervativně}$$

$$\frac{g}{t_f} \leq 20 - 28\beta \Rightarrow \frac{26}{9} \leq 20 - 28 \cdot 0,733 \Rightarrow 2,89 \leq -0,533$$

Je nutné posoudit mezipásový prut

Pro RHS profily

$$0,75 \leq \frac{b_1}{b_2} \leq 1,333 \Rightarrow 0,75 \leq 1 \leq 1,33$$

b) Plastifikace stěny pásu

$$N_{1,Rd} = \frac{f_{y0} t_w b_w}{\sin \theta_1} / \gamma_{M5} = \frac{235 \cdot 6 \cdot 160}{\sin 26} / 1 \cdot 10^{-3} = 431 \text{ kN}$$

c) Porušení mezipásového prutu

$$N_{i,Rd} = \frac{2f_{yi}t_i p_{eff}}{\gamma_{M5}}$$

Z důvodu použití výztuhy pod svislicí příhradové konstrukce je nutné použít upravený vztah:

$$N_{i,Rd} = \frac{2f_{yi}t_i(b_{eff} + b_{eff,s})}{\gamma_{M5}}$$

Efektivní šířky:

$$b_{eff} = t_w + 2r + \frac{7t_f f_{y0}}{f_{yi}} = 6 + 2 \cdot 15 + 7 \cdot 9 \cdot \frac{235}{235} = 99$$

$$b_{eff,s} = t_s + 2a + \frac{7t_f f_{y0}}{f_{yi}} = 8 + 2 \cdot 45 + 7 \cdot 9 \cdot \frac{235}{235} = 79$$

Pro obě efektivní šířky je nutné splnit podmínku:

$$b_{eff} + b_{eff,s} \leq b_i + h_i - 2t_i = 100 + 100 - 2 \cdot 4 = 192$$

$$178 \leq 192$$

VYHOVÍ

$$N_{i,Rd} = \frac{2f_{yi}t_i(b_{eff} + b_{eff,s})}{\gamma_{M5}} = \frac{2 \cdot 235 \cdot 4(99 + 79)}{1} \cdot 10^{-3} = 334,64 \text{ kN}$$

d) Smyk pásu

$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0}A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_1} / \gamma_{M5}$$

Součinitel pro výpočet smykové plochy pro RHS profil

$$\alpha_{RHS} = \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{4g^2}{3t_f^2}\right)}} = \sqrt{\frac{1}{\left(1 + \frac{4 \cdot 26^2}{3 \cdot 9^2}\right)}} = 0,287$$

Smyková plocha

$$A_v = A_0 - (2 - \alpha_{RHS})b_0t_f + (t_w + 2r)t_f = 3880 - (2 - 0,287) \cdot 160 \cdot 9 + (6 + 2 \cdot 15) \cdot 9 = 1737,5 \text{ mm}^2$$

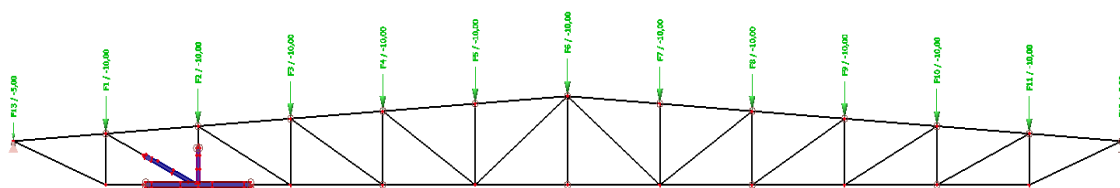
$$N_{i,Rd} = \frac{f_{y0}A_v}{\sqrt{3} \sin \theta_1} / \gamma_{M5} = \frac{235 \cdot 1737,5}{\sqrt{3} \cdot \sin 26} / \gamma_{M5} \cdot 10^{-3} = 537,76 \text{ kN}$$

Tabulka 16 - Tabulka návrhových sil dle normových postupů

Typ porušení	Návrhové síly [kN]
Plastifikace pásu	431,00
Porušení mezipásového prutu	334,64
Smyk pásu	537,76

6.3. Výsledky analýzy N styčnicku s jednou výztuhou

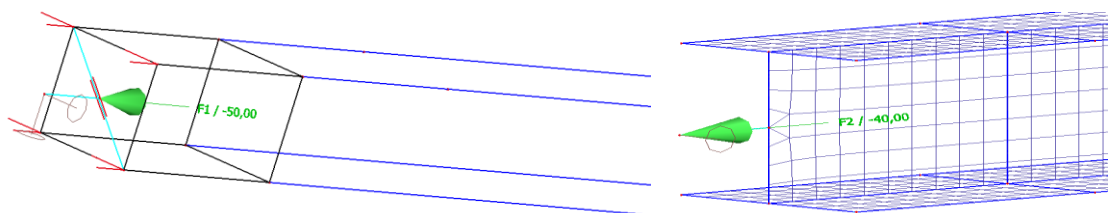
Analýza N styčnicku spočívá v uzlovém zatěžování příhradové konstrukce. Zatížení je zvyšováno pro nalezení hlavních poměrných plastických přetvoření pro návrh styčnicku. Mezní hodnota pro návrh dle normy [5], která udává hlavní poměrná plastická přetvoření pro tažené pruty na 0,2% více viz Kapitola 5.3 b).



Obrázek 62 - Uzlové zatížení příhradové konstrukce

Dále nebyl výpočet přerušen pro model s jednou výztuhou, aby bylo možné sledovat rozdíly výpočtu s různým zpevněním pružno-plastického materiálu, kde jsou hodnoty sledovány až nastane v prvcích pevnost oceli okolo 360 MPa. Zpevnění bylo uvažováno nejdříve na hodnotu 1 % z modulu pružnosti v tahu a tlaku, což odpovídá normovému deformačnímu zpevnění, které udává norma [4] viz Kapitola 5.3 b). Dále je zpevnění stanoveno na hodnotu 5%, 10%, 15%, 20% z hodnoty E.

V další části této analýzy budou prezentovány výsledky z N styčnicku, který byl modelován samostatně bez příhradové konstrukce. Zatěžován byl pouze tahovou silou v diagonále. Dále v diagonále a ve spodním pásu příhradové konstrukce jak zobrazeno na Obrázku 59.



Obrázek 63 - Zatížení diagonály samostatného N styčnicku

a) Model 1 – Výsledky N styčnicku s příhradovou konstrukcí

Níže v tabulce jsou vypsány hodnoty pro návrh N styčnicku, který je součástí příhradové konstrukce. Tabulka obsahuje výsledky ideálně pružno-plastického materiálu a materiálu se zpevněním E 1% (2100 MPa). Tyto hodnoty odpovídají normovým požadavkům a lze tedy konstatovat, že z těchto výsledků lze navrhnout styčnick na základě normy [4].

Tabulka 17 - Tabulka výsledných hodnot N styčnicku v příhradové konstrukci

Ideálně pružno-plastický materiál				
F [kN]	N _{diag} [kN]	σ [MPa]	ε _{pl_M} [%]	ε _{tot_M} [%]
0	0	0	0	0
10	74,25	101,7	0	0,051
15	111,41	152,3	0	0,076
20	148,59	202,9	0	0,101
25	185,79	235	0,027	0,139
30	222,98	235	0,103	0,215
33,5	248,91	235	0,200	0,305

* F – Uzlové zatížení

Tabulka 18 - Tabulka výsledných hodnot N styčnicku se zpevněním v příhradové konstrukci

Pružno-plastický materiál se zpevněním E 1%				
F [kN]	N _{diag} [kN]	σ [MPa]	ε _{pl_M} [%]	ε _{tot_M} [%]
0	0	0	0	0
10	74,25	101,7	0	0,051
15	111,41	152,3	0	0,076
20	148,59	202,9	0	0,101
25	185,79	235	0,027	0,139
34	252,6	237,2	0,2	0,319
35	259,95	237,5	0,253	0,367
40	296,03	243,5	0,746	0,865
45	331,13	271,6	2,605	2,124
50	353,2	311,5	4,633	4,784
55	368,11	335,9	5,813	5,973
60	361	356,2	6,729	6,894

* F – Uzlové zatížení

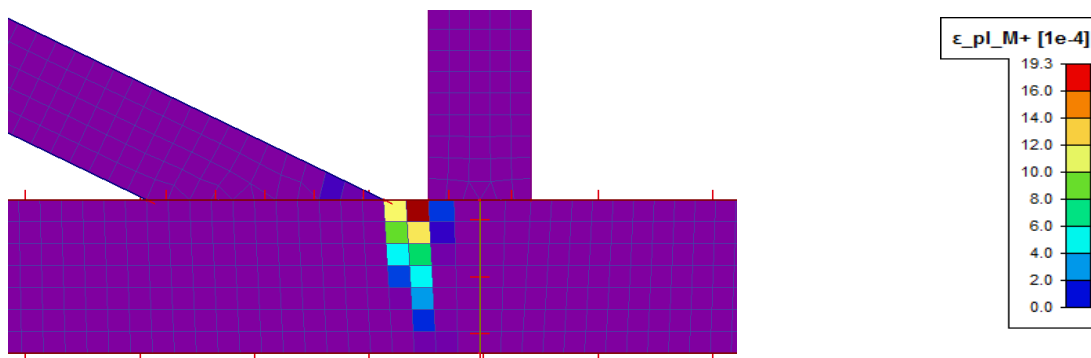
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Z tabulek 17 a 18 vyplývá, že dle návrhu metodou GMNA je návrhová síla pro ideálně pružno-plastický materiál $N_{Rd,IPP} = 248,91 \text{ kN}$, kdežto pro materiál se zpevněním o hodnotě 2100 MPa je návrhová síla $N_{Rd,E1\%} = 252,6 \text{ kN}$. Nárůst návrhové tahové síly je o $3,69 \text{ kN}$, níže v tabulce jsou hodnoty porovnány s přibližným výpočtem dle normy [6].

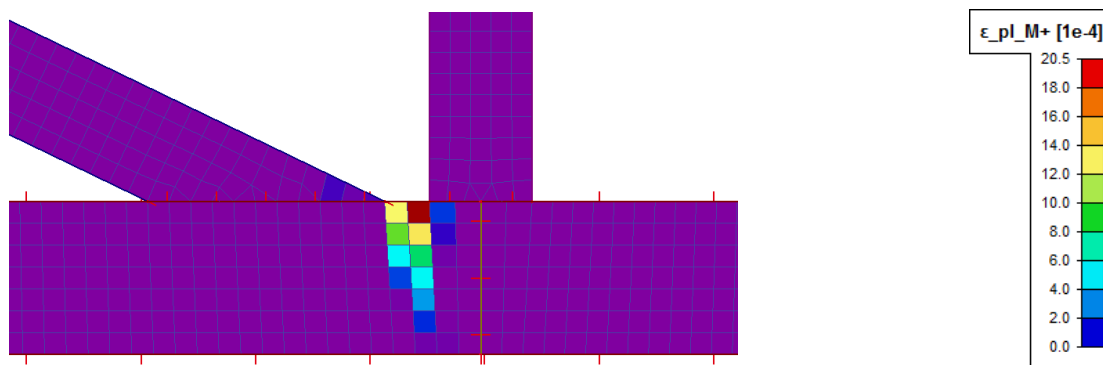
Tabulka 19 - Srovnání návrhových tahových sil pro diagonálu N styčnicku v příhradové konstrukci

Typ styčnicku	Dle ČSN EN 1993-1-8	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
N styčník v příhradové konstrukci	334,64 kN	248,91 kN	252,6 kN
Pokles návrhové síly		25,61 %	24,51 %

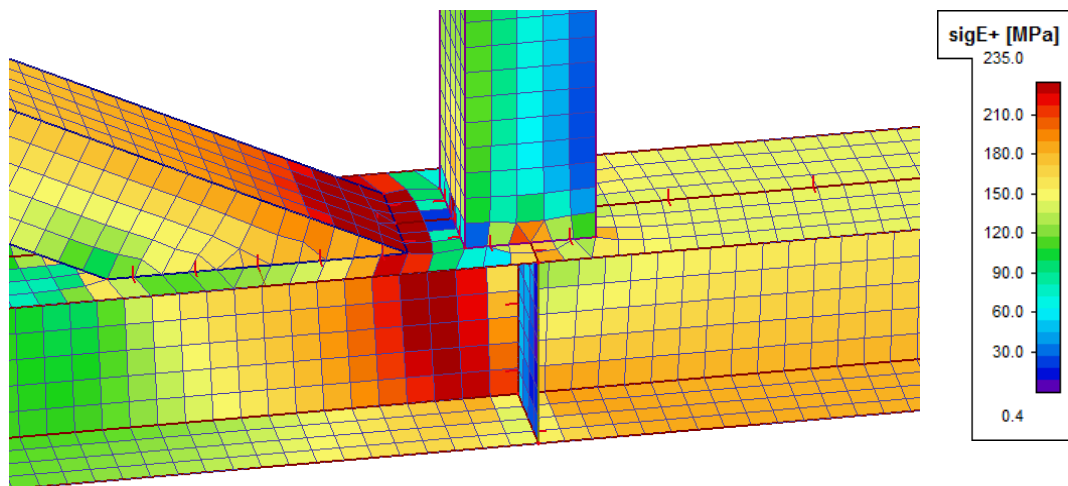
I když je výpočet skrze normové vztahy [6] jen orientační, z důvodu nedodržení zásad pro výpočet, které norma udává, je z Tabulky 19 patrné, že pokles návrhové síly pro N styčník je o 25,61 % respektive o 24,51 %.



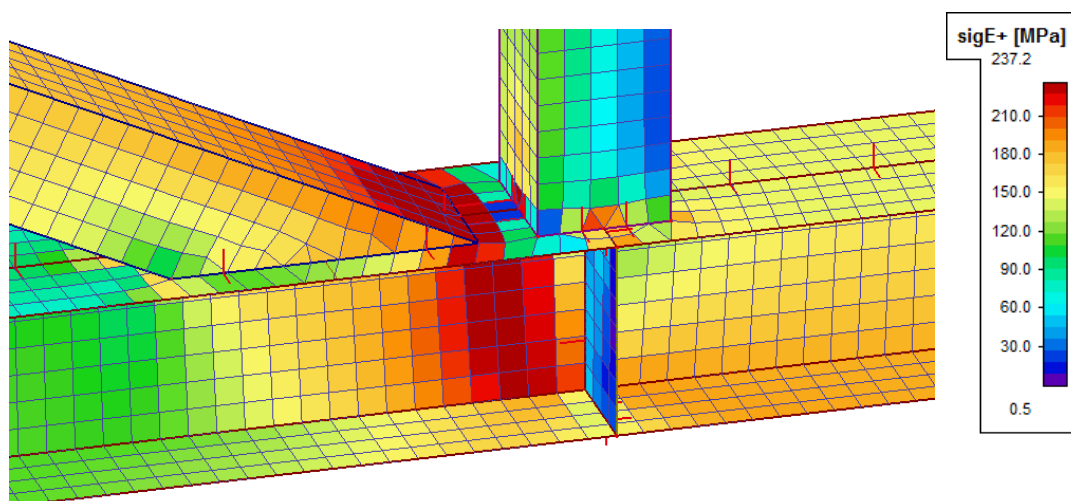
Obrázek 65 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ϵ_{pl_M} [%] ideálně pružno-plastického materiálu



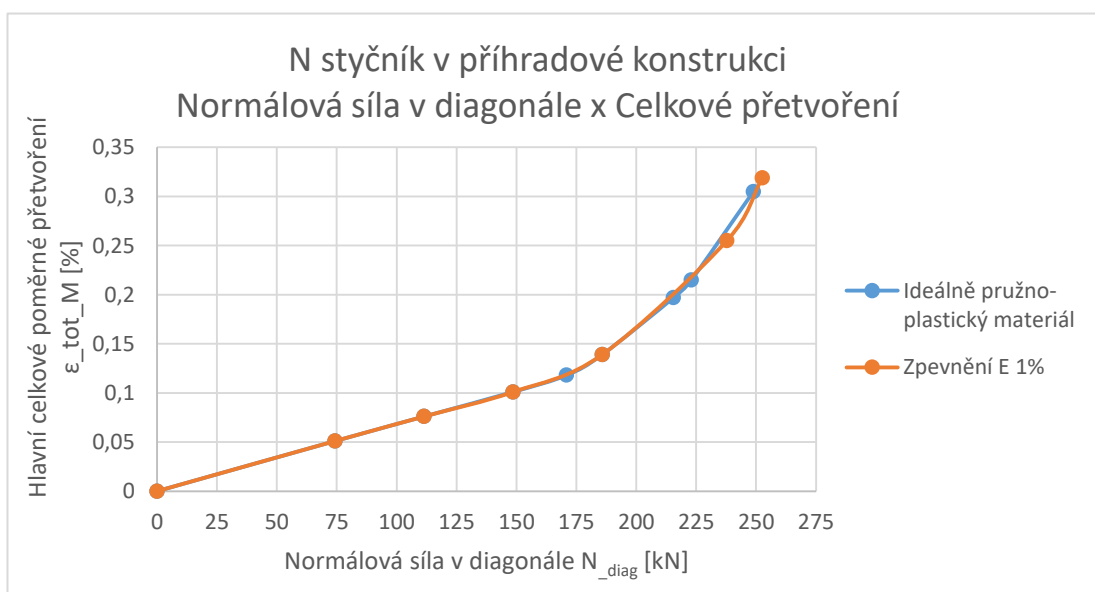
Obrázek 64 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ϵ_{pl_M} [%] se zpevněním E 1%



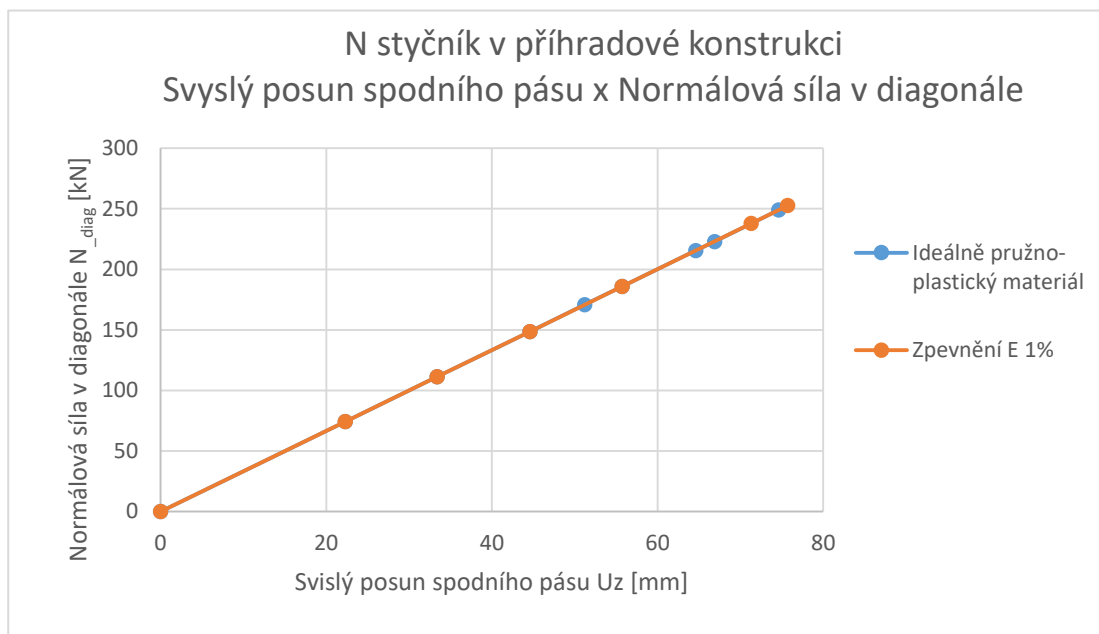
Obrázek 67 - Napětí N styčnicku při 0,2% plastického přetvoření



Obrázek 66 - Napětí N styčnicku se zpevněním E 1% při 0,2% plastického přetvoření

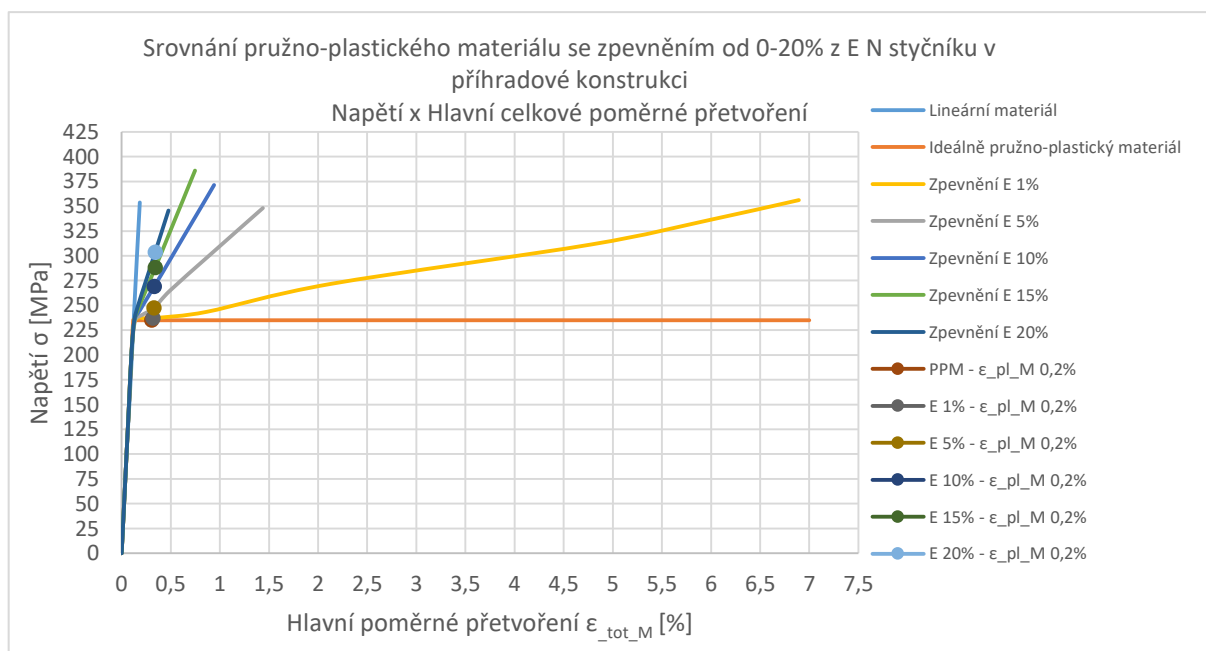


Graf 15 - Graf závislosti celkového poměrného přetvoření ϵ_{tot_M} a normálovou silou v diagonále N styčnicku s ideálně pružno-plastickým materiálem a se zpevněním E 1%



Graf 16 - Graf závislosti svislého posunu spodní pásnice a normálové síly v diagonále N styčníku s ideálně pružno-plastickým materiálem a se zpevněním E 1%

Níže v Grafu 17, jsou zobrazeny hodnoty všech výpočtů počínaje lineárním materiálem až po pružno-plastický materiál se zpevněním od 1-20%, dále je v grafu zobrazena hodnota ručního výpočtu a body zobrazující poměrné plastické přetvoření 0,2% dle návrhu normy [4]. Z těchto hodnot lze konstatovat, že návrh skrze skořepinový model v programu Scia Engineer je více na straně bezpečné, tabulkové hodnoty návrhových sil v Tabulce 19.



Graf 17 - Graf srovnání analýzy vlivu zpevnění materiálu na poměrné přetvoření N styčníku v příhradové konstrukci a napětí

b) Model 2 – Výsledky samostatného N styčnicku se dvěma silami

Tabulka 20 - Tabulka výsledných hodnot samostatného N styčnicku se dvěma silami

Ideálně pružno-plastický materiál			
F [kN]	σ [MPa]	ε_{pl_M} [%]	ε_{tot_M} [%]
0	0	0	0
25	38,6	0	0,018
50	76,8	0	0,037
100	152,5	0	0,073
150	233,5	0,021	0,111
200	234,9	0,122	0,189
235	235	0,2	0,254
250	235	0,239	0,289
255	235	0,255	0,304
258	235	0,261	0,310
265	235	0,292	0,364

* F – Síla v diagonále

Tabulka 21 - Tabulka výsledných hodnot samostatného N styčnicku se dvěma silami a se zpevněním

Pružno-plastický materiál se zpevněním E 1%			
F [kN]	σ [MPa]	ε_{pl_M} [%]	ε_{tot_M} [%]
0	0	0	0
25	38,6	0	0,018
50	76,8	0	0,037
100	152,5	0	0,073
150	233,4	0,02	0,111
200	236,4	0,119	0,187
240	237,8	0,2	0,26
250	238,2	0,229	0,282
300	251,6	0,763	0,879
310	259,7	1,06	1,178
350	365	4,898	5,848

* F – Síla v diagonále

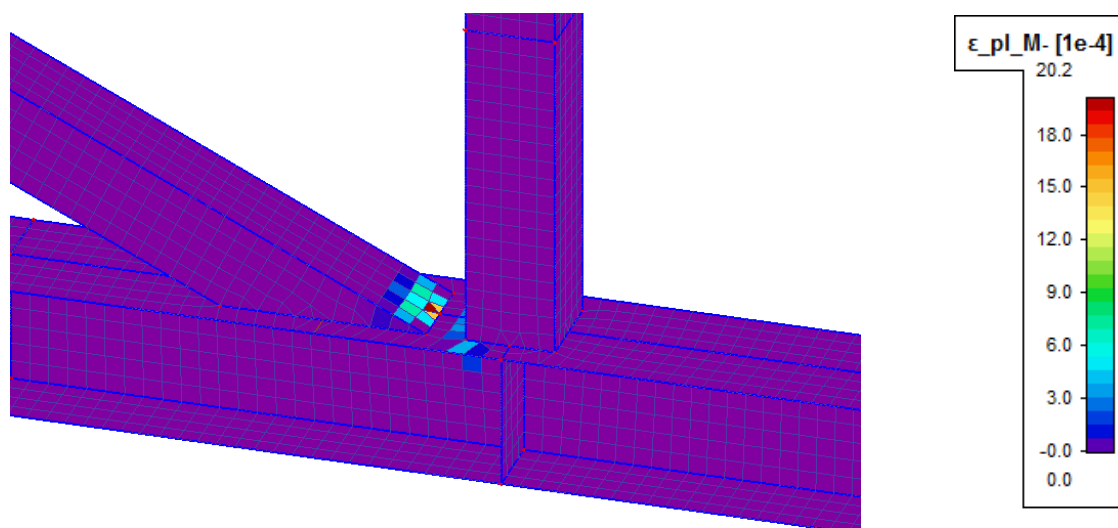
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výsledné návrhové hodnoty, které jsou uvedeny v Tabulkách 20 a 21 se blíží návrhovým hodnotám z prvního modelu celé příhradové konstrukce. Řešení okrajových podmínek v Modelu 2 je totožné, jak na Obrázku 59. Zatížení takového modelu je rovněž zobrazeno na Obrázku 59 a 63.

V Tabulkách 20 a 21 jsou pro orientaci uvedeny jen tahové síly. Tento model byl dále zatěžován tahovou silou ve spodním pásu příhradové konstrukce dle Obrázku 59. Spodní síla byla spočtena dle poměru mezi silami, který byl získán z prutové příhradové konstrukce, jak je uvedeno na Obrázku 58 a 59.

Tabulka 22 - Srovnání výsledných hodnot ručního výpočtů a numerického modelu N styčníku se dvěma silami

Typ styčníku	Dle ČSN EN 1993-1-8	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
N styčník v příhradové konstrukci	334,64 kN	235 kN	240 kN
Pokles návrhové síly		29,77 %	28,28 %



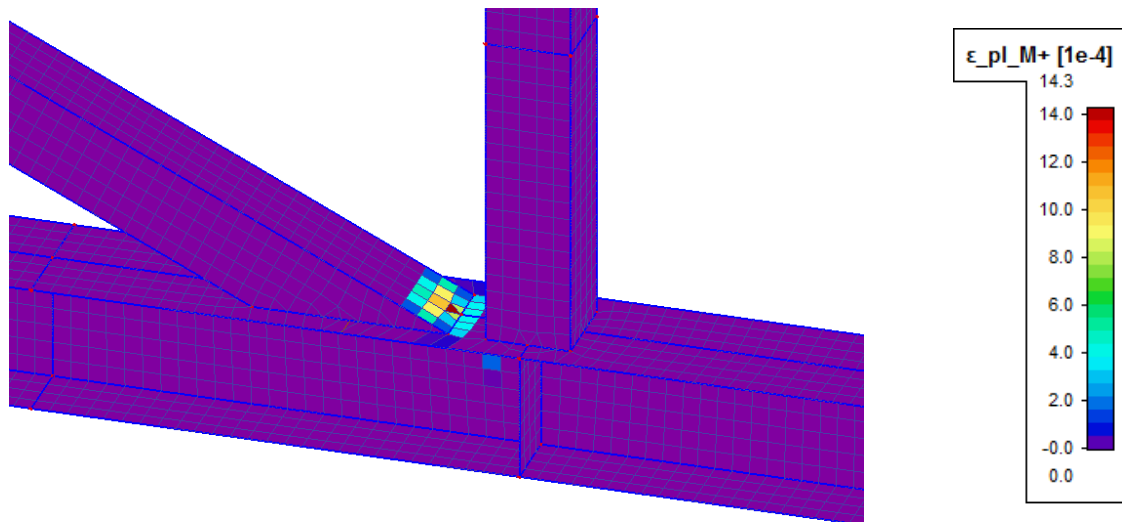
Obrázek 68 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ϵ_{pl_M} [%] ideálně pružno-plastického materiálu

Při návrhu samostatného N styčníku se dvěma silami bylo zjištěno odlišné poměrné plastické přetvoření na každém z obou povrchů. Proto je tedy nutné pro návrh dle normy [4] vypočítat průměr z těchto dvou hodnot:

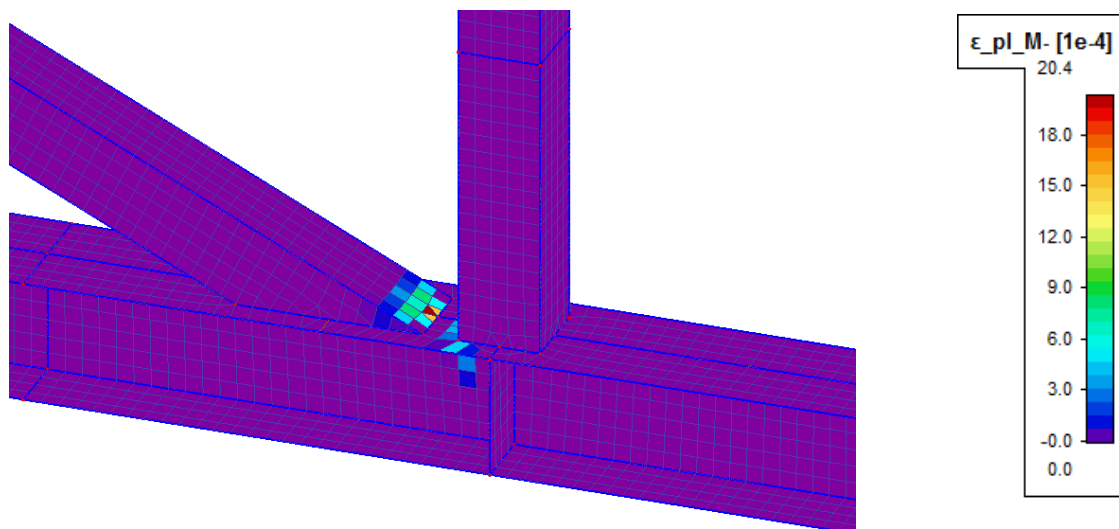
$$\varepsilon_{pl,celk} = \frac{\varepsilon_{pl_M+} + \varepsilon_{pl_M-}}{2} = \frac{14,3 + 20,2}{2} = 17,25 = 0,173 \%$$

$$\varepsilon_{pl,celk} = 0,173 \% \leq \varepsilon_{pl} = 0,2\%$$

VYHOVÍ



Obrázek 69 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ε_{pl_M+} [%] ideálně pružno-plastického materiálu

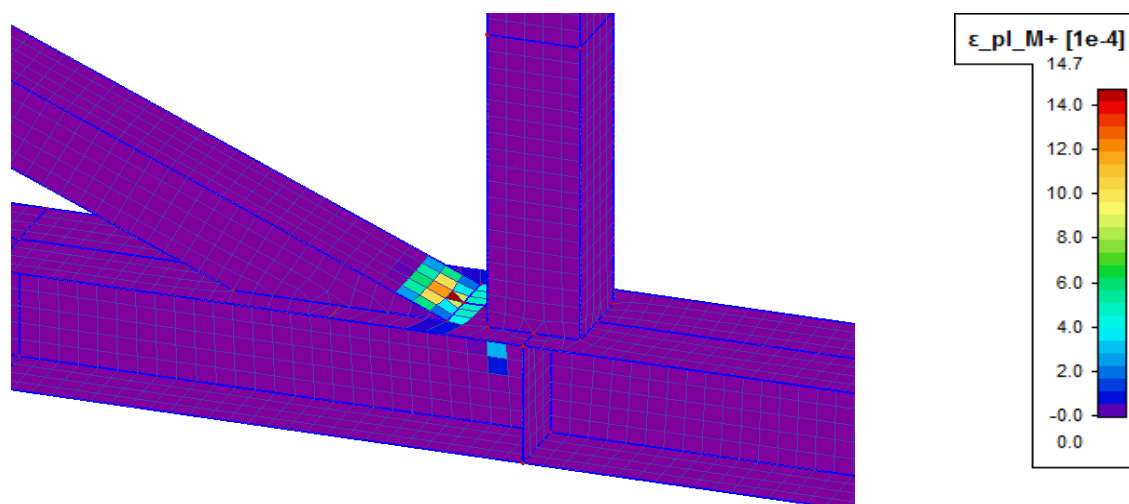


Obrázek 70 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ε_{pl_M-} [%] se zpevněním E 1%

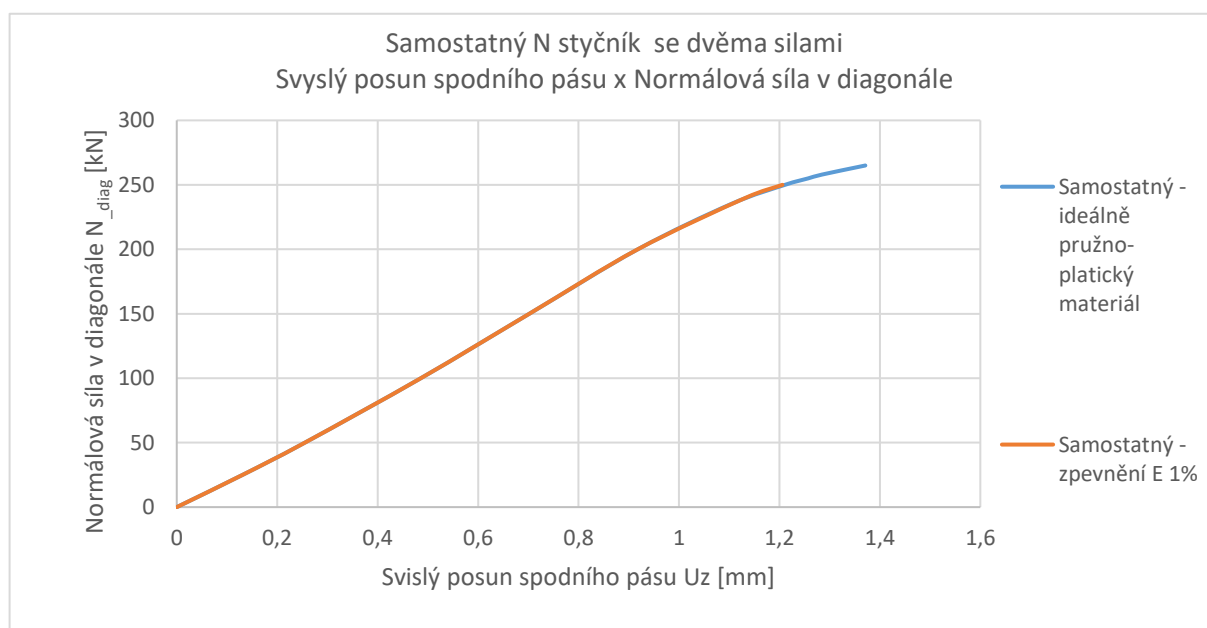
$$\varepsilon_{pl,celk} = \frac{\varepsilon_{pl_M+} + \varepsilon_{pl_M-}}{2} = \frac{14,7 + 20,4}{2} = 17,55 = 0,176 \%$$

$$\varepsilon_{pl,celk} = 0,176 \% \leq \varepsilon_{pl} = 0,2\%$$

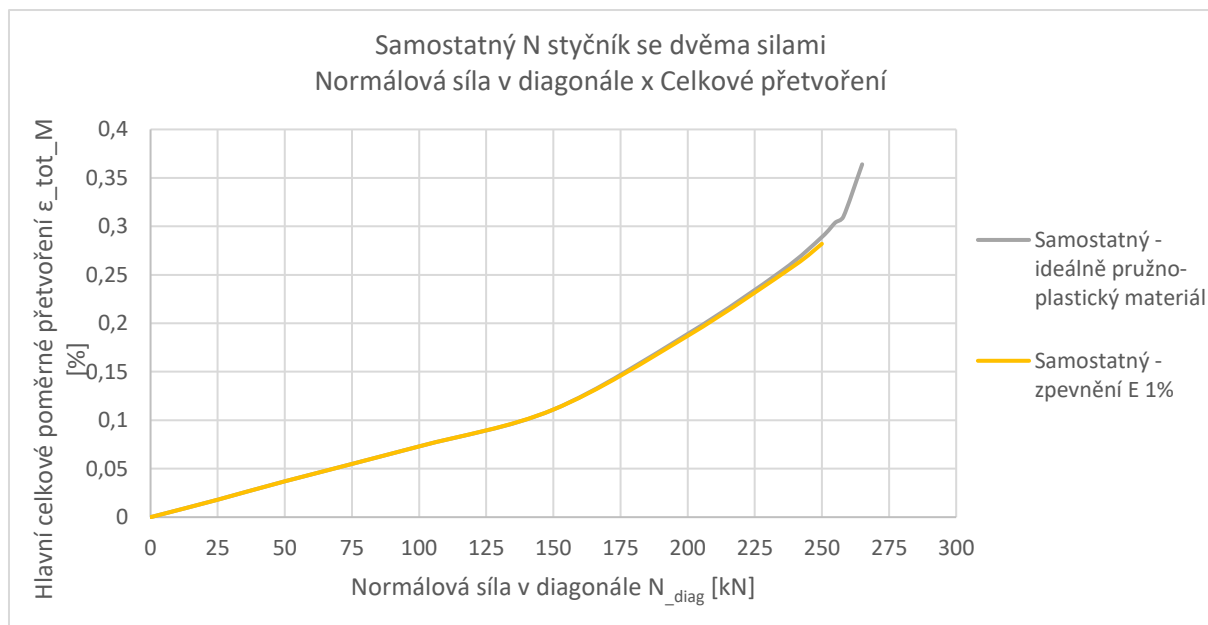
VYHOVÍ



Obrázek 71 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ϵ_{pl_M+} [%] se zpevněním E 1%



Graf 18 - Graf závislosti celkového poměrného přetvoření ϵ_{tot_M} a normálovou silou v diagonále N styčníku se dvěma silami s ideálně pružno-plastickým materiálem a se zpevněním E 1%



Graf 19 - Graf srovnání analýzy vlivu zpevnění materiálu na návrhové hodnoty únosnost diagonály a poměrné přetvoření samostatného N styčníku se dvěma silami

6.3.1. Vyhodnocení a srovnání výsledků

Byla provedena analýza příhradového N styčníku vytvořeného třemi různými numerickými modely a to: model N styčníku v celé příhradové konstrukci, samostatný numerický model N styčníku zatížen jednou silou a samostatný model N styčníku zatížen dvěma silami. Níže v Tabulce 23 jsou srovnány všechny návrhové normálové síly v diagonále, které byly získány buď orientačním ručním výpočtem, nebo numerickými modely. Hodnoty jsou omezeny na plastickém poměrném přetvoření 0,2% na každém povrchu.

Analýza dle plastických poměrných přetvoření byla hlavním omezením návrhu styčníku, jelikož se jedná o návrh tažených prutů, nerozhodovalo zde, jak tomu bylo u rámového rohu, celkové poměrné přetvoření, které bylo v této analýze přibližně stejné jako plastické přetvoření při podmínce $\varepsilon_{pl} \leq 0,2\%$.

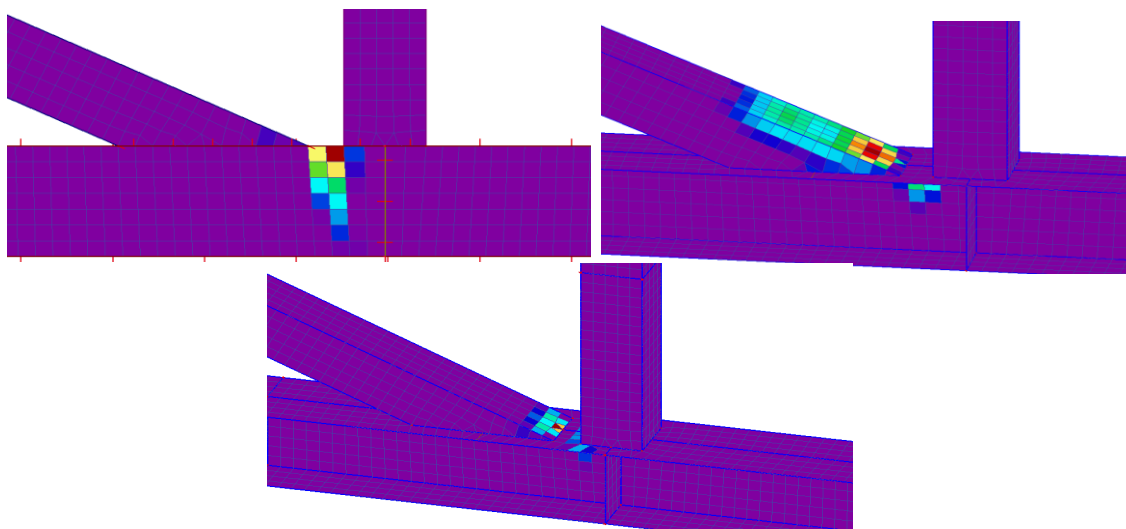
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 23 - Porovnání a procentuální vyhodnocení výsledných návrhových sil

Typ styčnicku	Dle ČSN EN 1993-1- 8	Ideálně pružno- plastický materiál	Zpevnění E 1%	Porovnání s ČSN EN 1993-1-8
N styčník v příhradové konstrukci	334,64 kN	248,91 kN	252,6 kN	25,61/24,51 %
Samostatný N styč. s jednou silou	334,64 kN	305 kN	310 kN	8,86/7,36 %
Samostatný N styčník se dvěma silami	334,64 kN	235 kN	240 kN	29,77/28,28 %
Procentuální porovnání numerických modelů s příhradovou konstrukcí				
Samostatný N styčník		18,39 %	18,51 %	Nárůst
Samostatný N styčník se dvěma silami		5,92 %	5,25 %	Pokles

V analýze příhradové konstrukce je zjištěn oproti výpočtu dle normy [6] pokles návrhové síly až o 30 %.

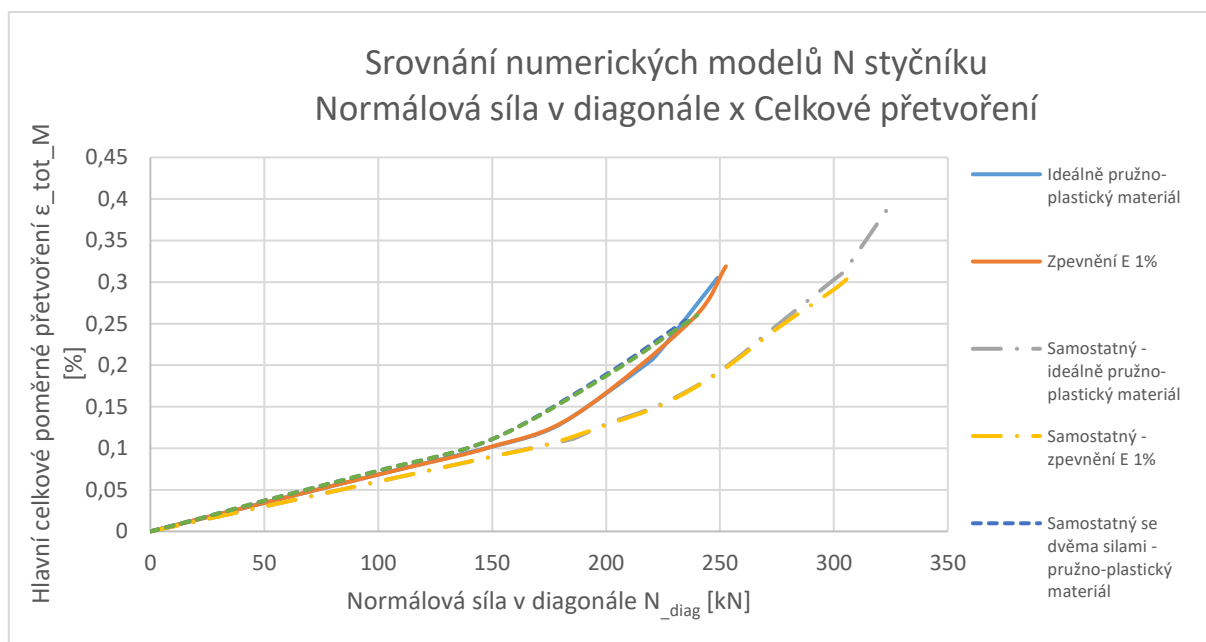
Jelikož rozdíl mezi modely celé příhradové konstrukce a styčnicku se dvěma silami je pouze 6 % dá se konstatovat, že řešení okrajových podmínek na modelu 2 je správné a návrh dle těchto hodnot je rovněž použitelný. Avšak analýza modelu celé příhradové konstrukce se zdá být nejvhodnější z hlediska nejsnadnějšího vyřešení okrajových podmínek.



Obrázek 72 - Srovnání oblastí plastických poměrných deformací jednotlivých modelů a) model celé příhradové konstrukce b) samostatný N styčník c) samostatný N styčník se dvěma silami

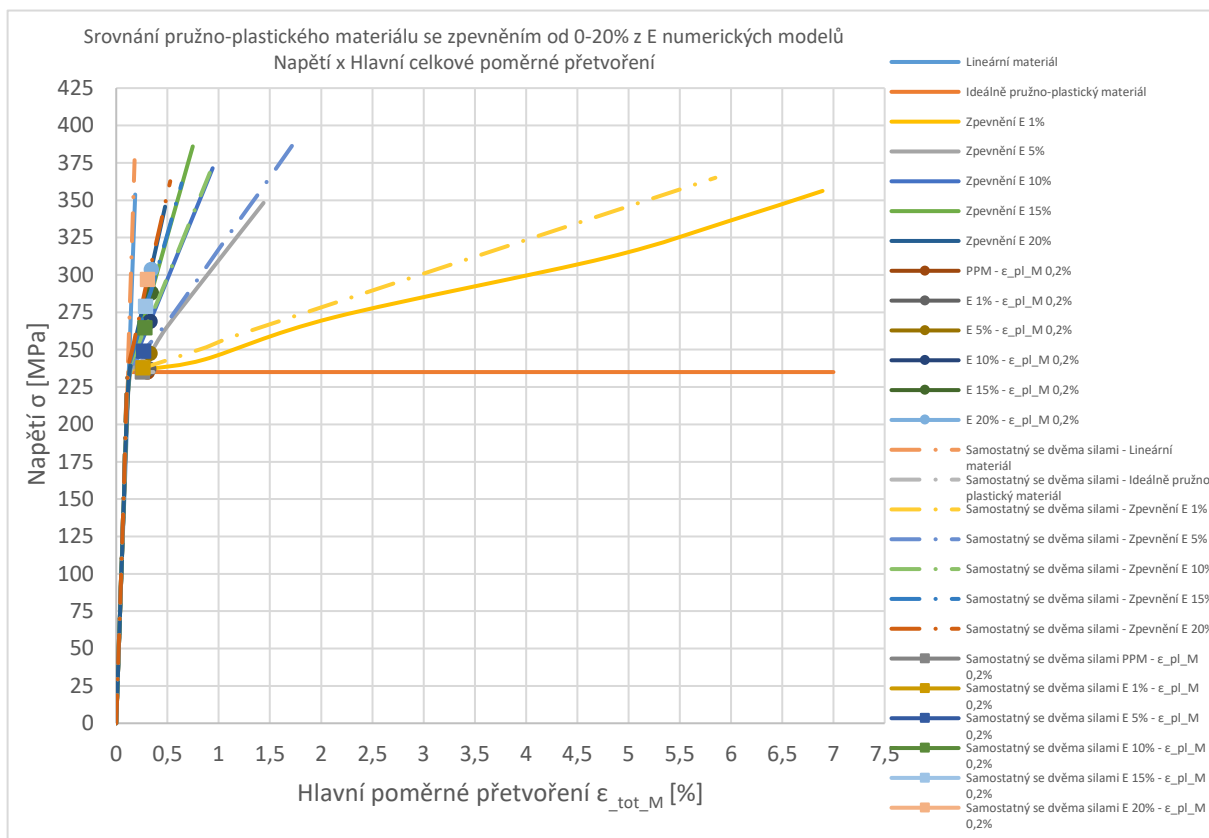
Ze srovnání oblastí plastických poměrných deformací, jak je uvedeno na Obrázku 74, lze vidět, že poloha této oblasti se mění se změnou numerického modelu. V modelu celé příhradové konstrukce Obrázek 74a) je oblast plastických deformací na stěně spodního pásu příhradové konstrukce, kdežto v samostatných modelech jsou tyto oblasti na diagonále N styčnicku.

Na Grafu 20 je srovnání návrhových normálových sil v diagonále v závislosti na celkové poměrné deformaci styčnicku. Stejně jako tomu bylo v Tabulce 23 i zde jsou výsledky modelu celé příhradové konstrukce a styčnicku se dvěma silami velmi podobné. Kdežto u styčnicku s jednou silou je odklon této křivky poměrně výrazný.

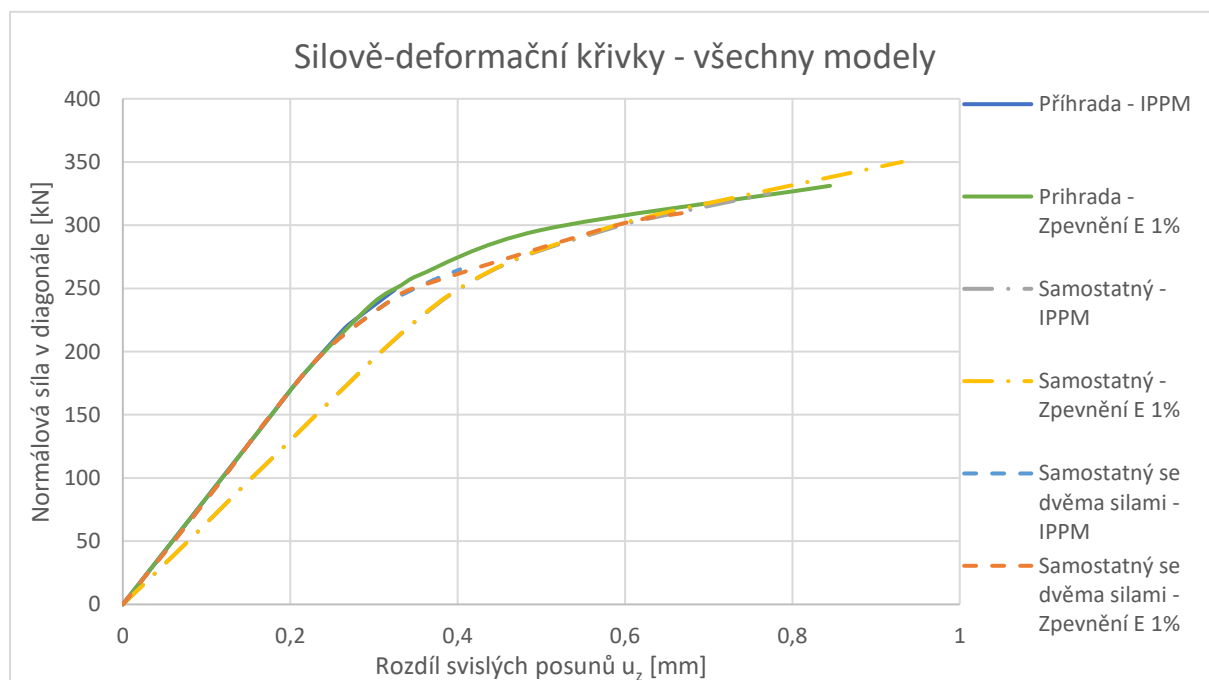


Graf 20 - Graf srovnání modelu příhradové konstrukce a modelu samostatného N styčnicku se dvěma silami se zpevněním 0,2% z E v závislosti napětí a hlavním poměrném přetvoření

DIPLOMOVÁ PRÁCE



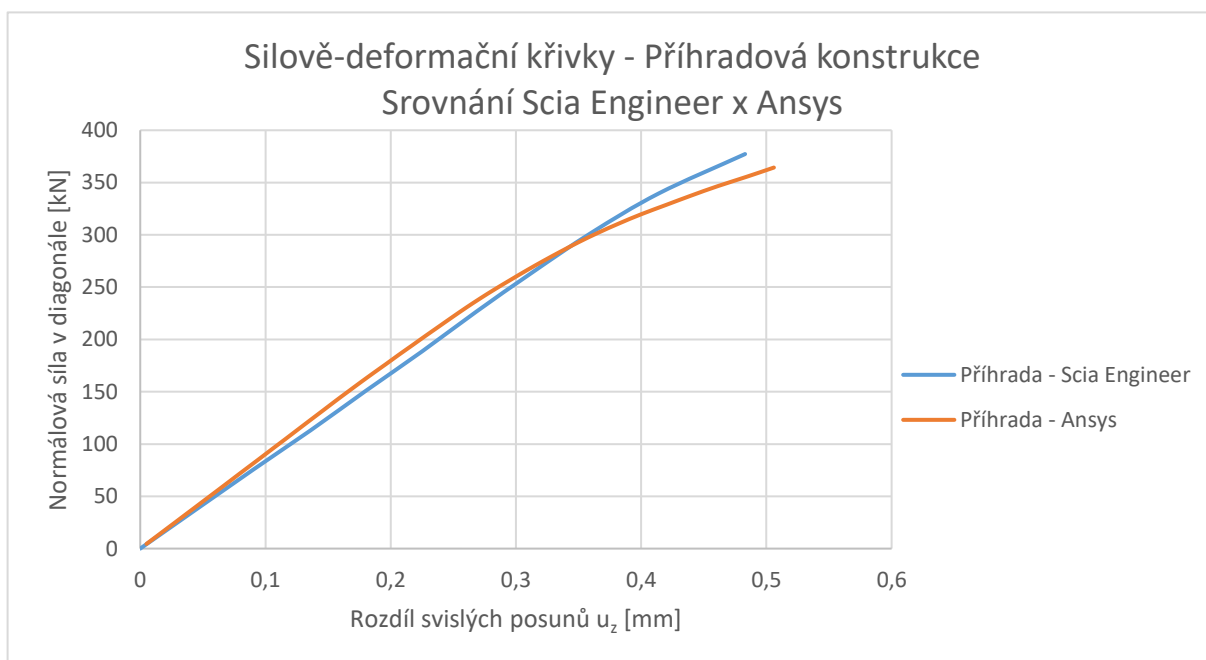
Graf 21 - Graf srovnání všech numerických modelů normálové síly a celkovém poměrném přetvoření



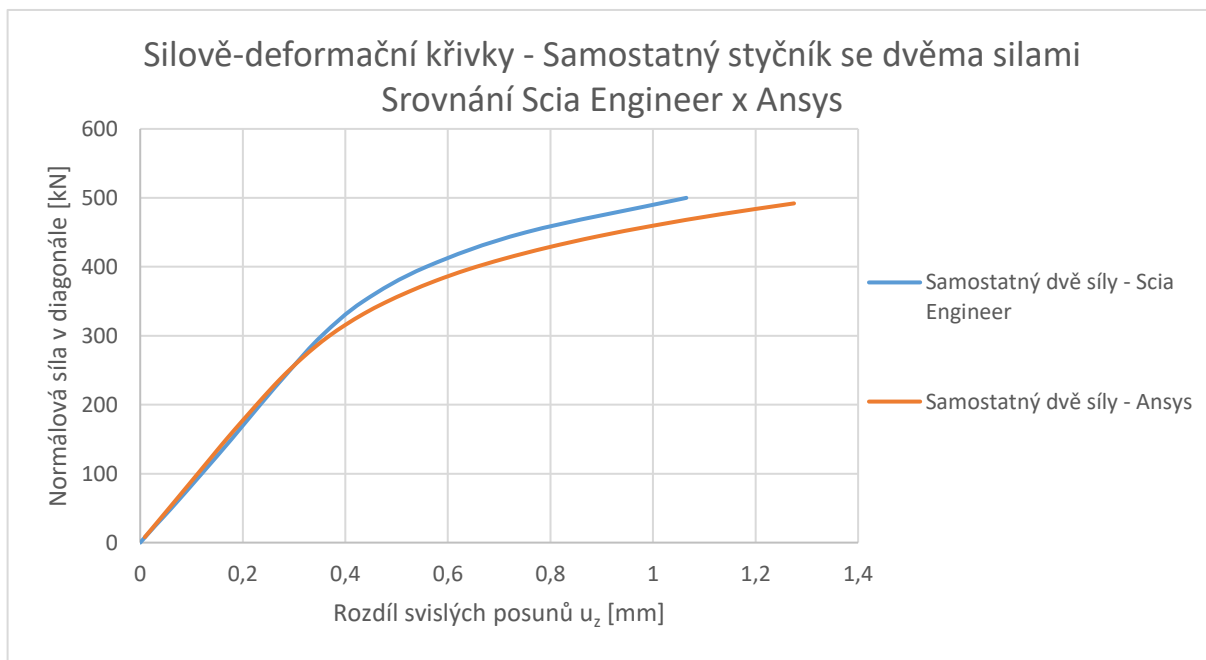
Graf 22 - Silově deformační křivka všech modelů pro ideálně pružno-plastický materiál a materiál se zpevněním E 1%

a) Srovnání výsledků s programem Ansys

Poslední částí závěru analýzy N styčnicku je srovnání výpočtů z programů Scia Engineer a Ansys. Rozdíl oproti výpočtům, které jsou uvedeny výše je, že pro toto posouzení byly k dispozici výsledky z programu Ansys získány z [7] s mezí kluzu $f_y = 355 \text{ MPa}$. Proto musel být model v programu Scia přepočítán a následně srovnán s výsledky z programu Ansys.



Graf 24 - Graf silově-deformačních křivek srovnání Scia engineer a Ansys pro model celé příhradové konstrukce

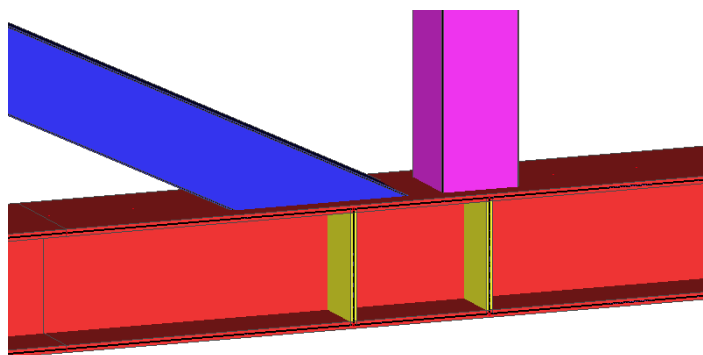


Graf 23 - Graf silově-deformačních křivek srovnání Scia engineer a Ansys pro samostatný model N styčnicku se dvěma silami

Z obou srovnávacích Grafů 23 a 24 je patrné, že výpočty numerických modelů z programu Scia Engineer jsou více tuhé. Normálové síly v závislosti na svislém posunu jsou větší než tomu je ve výpočtech z programu Ansys.

6.4. Výsledky analýzy N styčnicku se dvěma výztuhami

Stejným principem jako tomu bylo v Kapitole 6.3. je i tento styčník se dvěma výztuhami řešen. V zmíněné kapitole bylo zjištěno, že návrh skrze numerický model je nejvhodnější buď jako celá příhradová konstrukce se skořepinovým modelem daného styčnicku, případně pro srovnání samostatný skořepinový model se dvěma silami. Síly se shodují s poměrem normálových sil z prutového modelu příhradoviny viz Obrázek 58. Dále je nutné dodržet okrajové podmínky, které se musí shodovat s chováním celé příhradové konstrukce viz Obrázek 59. Proto tedy bude v této analýze vynechán model s jednou silou v diagonále.



Obrázek 73 - Model N styčnicku s dvěma výztuhami

Druhá výztuha je stejných rozměrů jako první se stejnou tloušťkou 8mm, vzdálenost výztuh je 177 mm, první výztuha je umístěna přesně uprostřed pod svislicí.

a) Model 1 – Výsledky N styčnicku v příhradové konstrukci

Tabulka 24 - Tabulka výsledných hodnot N styčnicku v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami

Ideálně pružno-plastický materiál				
F [kN]	N_diag [kN]	σ [MPa]	ε_{pl_M} [%]	ε_{tot_M} [%]
0	0	0	0	0
10	74,3	101,5	0	0,051
15	111,48	152	0	0,076
20	148,68	202,5	0	0,101
25	185,91	232,4	0,028	0,14
27	200,81	235	0,055	0,167
30	223,15	235	0,106	0,218
33,5	249,19	235	0,2	0,314
34	252,89	235	0,227	0,339
35	260,29	235	0,286	0,397

* F – Uzlové zatížení

Tabulka 25- Tabulka výsledných hodnot N styčnicku v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami

Pružno-plastický materiál se zpevněním E 1%				
F [kN]	N_diag [kN]	σ [MPa]	ε_{pl_M} [%]	ε_{tot_M} [%]
0	0	0	0	0
10	74,3	101,5	0	0,051
15	111,48	125	0	0,076
20	148,68	202,5	0	0,101
25	185,91	232,8	0,028	0,14
30	223,15	235,4	0,103	0,216
34	252,9	236,7	0,2	0,315
35	260,3	237,8	0,267	0,381

* F – Uzlové zatížení

DIPLOMOVÁ PRÁCE

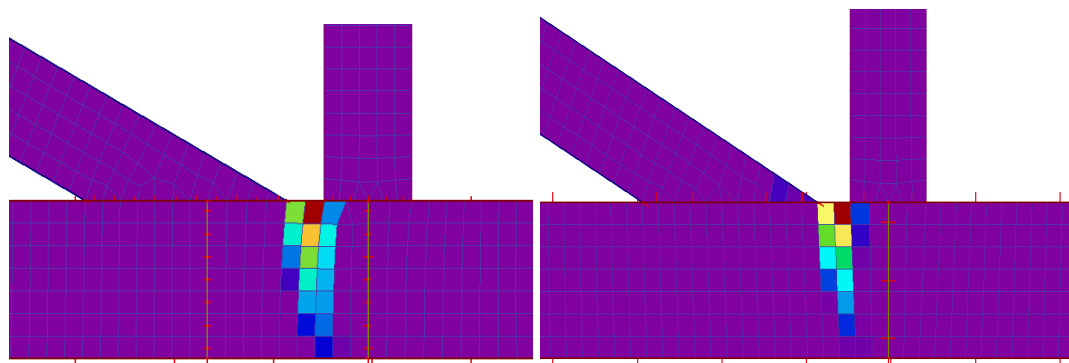
Tabulka 26 - Porovnání výsledků s výpočty styčnicku s dvěma výztuhami dle normy [6]

Typ styčnicku	Dle ČSN EN 1993-1-8	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
N styčnick v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami	334,64 kN	249,19 kN	252,9 kN
Pokles návrhové síly		25,53 %	25,08 %

Tabulka 27 - Porovnání návrhových normálových sil dle numerických modelů s příhradovou konstrukcí

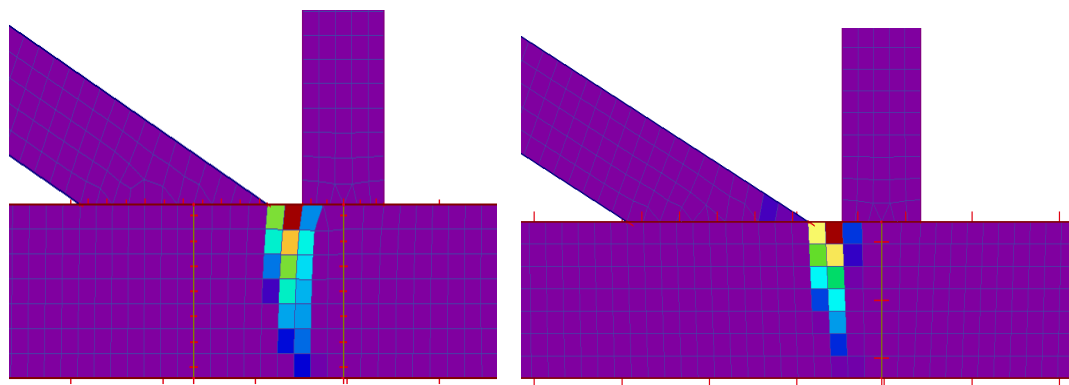
Typ styčnicku	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
N styčnick v příhradové konstrukci s jednou výztuhou	248,91 kN	252,6 kN
N styčnick v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami	249,19 kN	252,9 kN
Nárůst návrhové síly v diagonále	0,12 %	0,12 %

Dle Tabulky 27 je nárůst návrhové normálové síly v diagonále vlivem umístění druhé výztuhy pod taženou diagonálu o 0,12 %, což se dá konstatovat, že na tuto návrhovou sílu neměla výztuha prakticky žádný vliv.



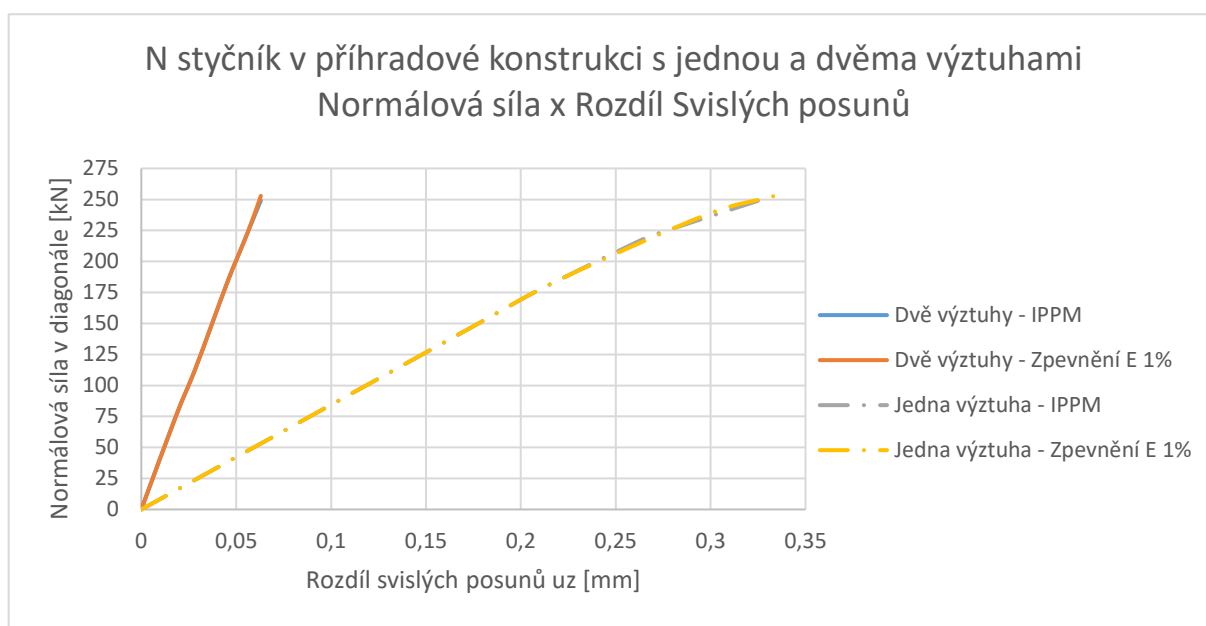
Obrázek 74 - Plastické přetvoření 0,2% N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami a) styčnick s dvěma výztuhami b) styčnick s jednou výztuhou

Přidáním druhé výztuhy pod taženou diagonálu se nezměnila oblast plastického přetvoření, která se stále vyskytuje na stěně spodního nosníku příhradové konstrukce, jak je zobrazeno na Obrázku 74.



Obrázek 75 - Plastické přetvoření 0,2% N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami při zpevnění E 1%
a) styčnick s dvěma výztuhami b) styčnick s jednou výztuhou

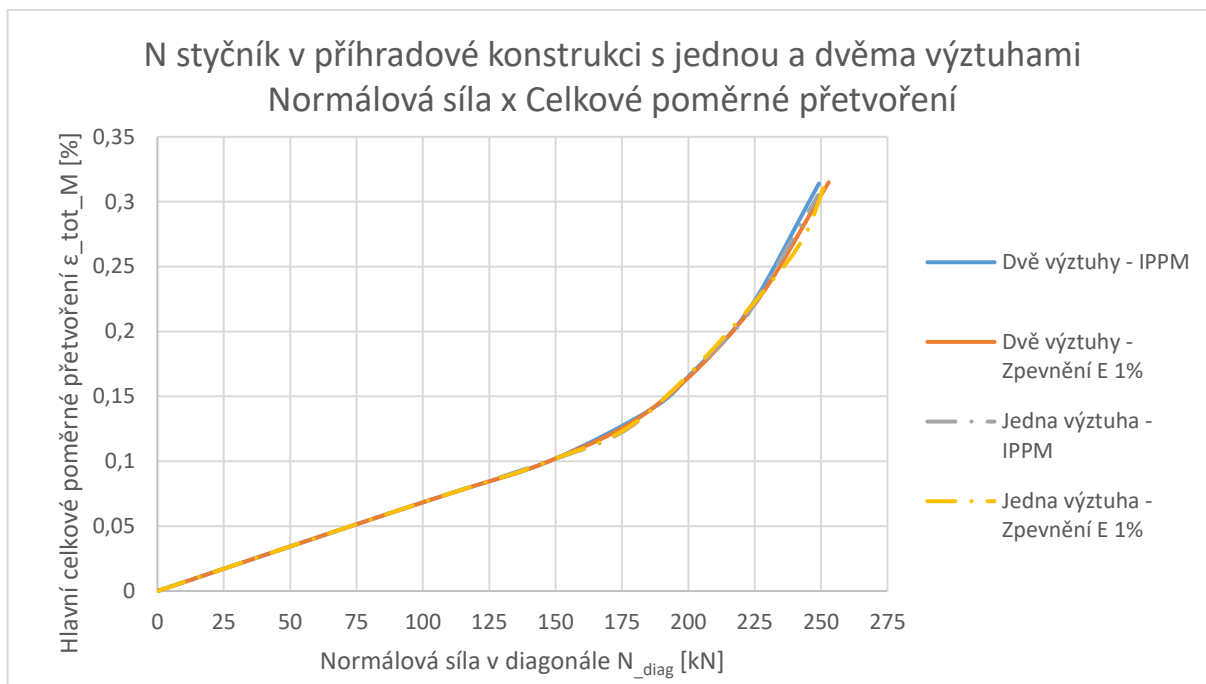
Obdobně jak tomu bylo u ideálně pružno-plastického materiálu i zde, u materiálu s deformačním zpevněním na E 1%, nedošlo k změně oblasti poměrného plastického přetvoření, které zůstává na stěně spodního pásu stejně jako u styčnicku s jednou výztuhou.



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 25 - Srovnání silově-deformačních křivek N styčnicku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %

V Tabulce 27 bylo uvedeno, že přidání druhé výztuhy má minimální vliv na výslednou návrhovou normálovou sílu v diagonále na základně poměrných plastických přetvoření. Pokud na Grafu 25 srovnáme rozdíl svislých posunů (posun pásnice spodního nosníku vůči stěně nosníku) je možné vliv výztuhy zpozorovat.



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 26 - Srovnání N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami na základně poměrném přetvoření a normálové síle v diagonále

b) Model 2 – Výsledky samostatného N styčníku

Tabulka 28 - Výsledné hodnoty samostatného N styčníku se dvěma výztuhami

Ideálně pružno-plastický materiál			
F [kN]	σ [MPa]	ε_{pl_M} [%-]	ε_{tot_M} [%]
0	0	0	0
25	34,3	0	0,016
50	68,3	0	0,033
100	135,7	0	0,065
150	202,6	0	0,096
175	235	0,001	0,112
200	235	0,024	0,135
250	235	0,145	0,256
257	235	0,2	0,306
260	235	0,223	0,334
300	235	1,856	1,966

* F – Síla v diagonále

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 29 - Výsledné hodnoty samostatného N styčnicku se dvěma výztuhami a se zpevněním E 1%

Pružno-plastický materiál se zpevněním E 1%			
F [kN]	σ [MPa]	ε_{pl_M} [%]	ε_{tot_M} [%]
0	0	0	0
25	34,3	0	0,016
50	68,3	0	0,033
100	135,7	0	0,065
150	202,6	0	0,096
200	235,4	0,023	0,135
250	236,5	0,137	0,279
260	237,9	0,2	0,317
265	238,8	0,249	0,362
300	253,7	0,905	1,023

* F – Síla v diagonále

Na rozdíl od výpočtu samostatného styčnicku s jednou výztuhou viz Kapitola 6.3.c), kde byly plastické poměrné přetvoření rozdílné na každém z povrchů, v tomto výpočtu s dvěma výztuhami jsou oba povrchy totožné a není tedy potřeba vypočítat průměr z obou hodnot.

Tabulka 30 - Porovnání výsledků s výpočty samostatného N styčnicku s dvěma výztuhami dle normy [6]

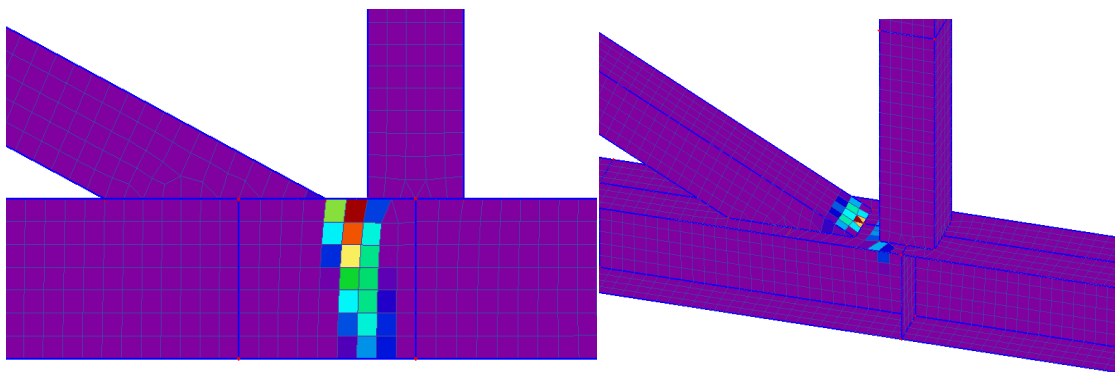
Typ styčnicku	Dle ČSN EN 1993-1-8	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
N styčnick v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami	334,64 kN	257 kN	260 kN
Pokles návrhové síly		23,20 %	22,30 %

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 31 - Porovnání návrhových normálových sil dle numerických modelů samostatného styčnicku

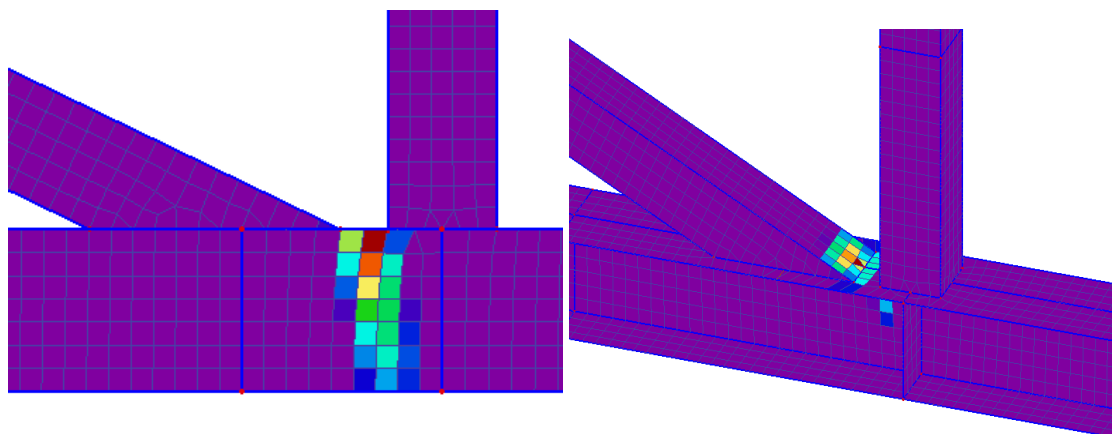
Typ styčnicku	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
Samostatný N styčník s jednou výztuhou	235 kN	240 kN
Samostatný N styčník se dvěma výztuhami	257 kN	260 kN
Nárůst návrhové síly v diagonále	8,56 %	7,69 %

Pokud srovnáme rozdíly návrhových sil, které byly zjištěny na modelu s celou příhradovou konstrukcí, kde byl rozdíl těchto sil nepatrný, konkrétně 0,12 %, v samostatném modelu s dvěma výztuhami je nárůst návrhové síly v diagonále o 7,5 % respektive 8,6 %.



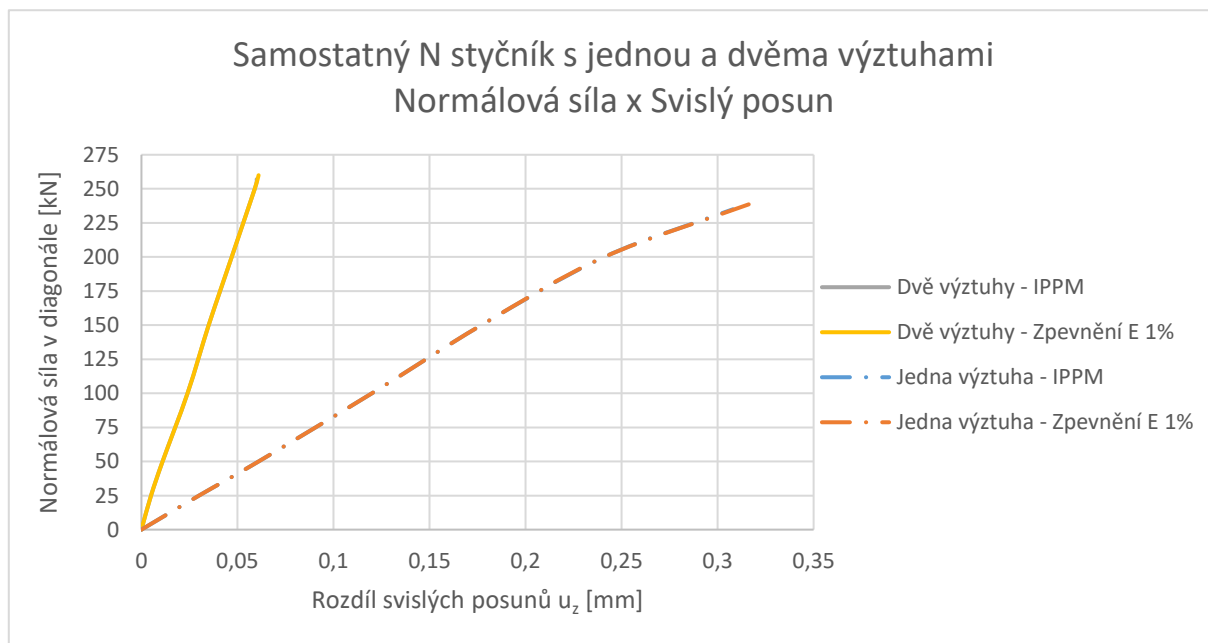
Obrázek 76 - Plastické přetvoření 0,2% samostatného N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami
a) styčník s dvěma výztuhami b) styčník s jednou výztuhou

V analýze samostatného N styčnicku s jednou výztuhou viz Obrázek 68, 69 a 76b) byla oblast poměrného plastického přetvoření 0,2 % ve styku diagonály a horní pásnici spodního pásu příhradové konstrukce. Přidáním druhé výztuhy pod taženou diagonálu se oblast plastického přetvoření posunula na stěnu spodního nosníku obdobně jako u modelu s celou příhradovou konstrukcí, viz Obrázek 76, 77.



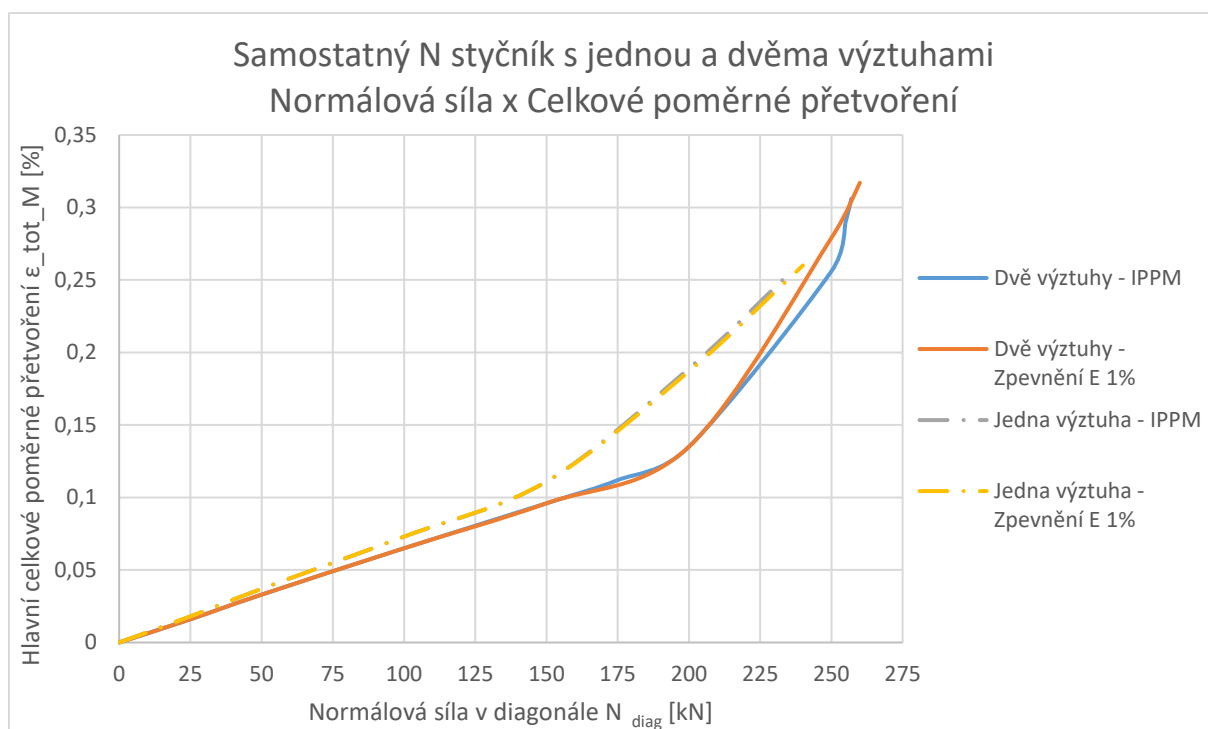
Obrázek 77 - Plastické přetvoření 0,2% samostatného N styčnicku se zpevněním E 1% s jednou a dvěma výztuhami a) styčník s dvěma výztuhami b) styčník s jednou výztuhou

U výpočtu samostatného N styčnicku se zpevněním E 1% s jednou a dvěma výztuhami se oblast plastického přetvoření rovněž posunula na stěnu spodního nosníku příhradové konstrukce.



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 27- Srovnání silově-deformačních křivek samostatného N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 28- Srovnání silově-deformačních křivek samostatného N styčníku s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %

V Kapitole 6.4.a) byly srovnány výsledky numerického modelu v příhradové konstrukci. Z Grafu 26 je patrné, že vliv druhé výztuhy na návrhovou sílu má minimální vliv a odklon křivek je minimální. Ve srovnávacím Grafu 27 numerického modelu samostatného N styčníku je odklon těchto křivek znatelný a se zvyšující se silou v diagonále je rozdíl svislých posunů menší, než tomu bylo v modelu s jednou výztuhou. Návrhová normálová síla je větší viz Tabulka 31 o 7,5 – 8,5 %.

6.4.1. Vyhodnocení a srovnání výsledků

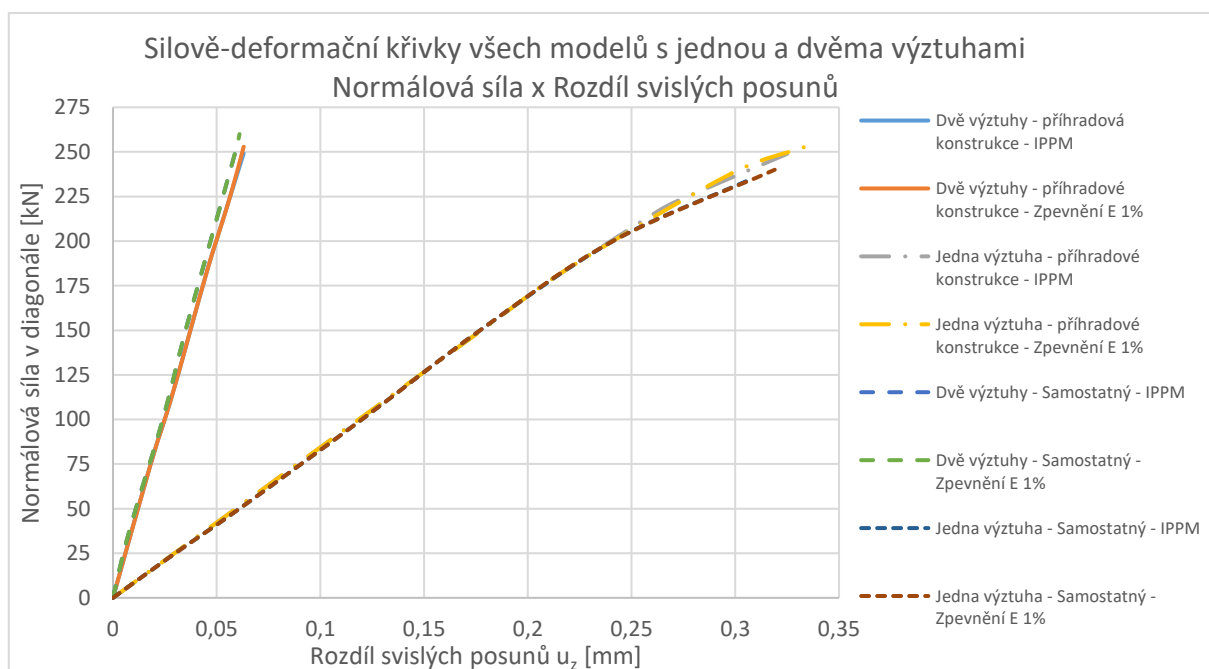
Byla provedena analýza numerického modelu N styčníku, který byl součástí celé příhradové konstrukce (Model 1) nebo samostatného styčníku (Model 2), který byl zatěžován dvěma silami. Jak už bylo zmíněno na začátku Kapitoly 6.4. model, který zahrnoval jen jednu sílu v diagonále a zanedbával sílu ve spodním pásu příhradové konstrukce byl z analýzy vynechán, neboť se předpokládá, že Model 1, který zahrnuje účinky celé konstrukce, by se měl blížit reálnému chování. A proto právě model s jednou silou byl se svými výsledky nejdále Modelu 1. V Tabulce 32 jsou výsledky obou modelů shrnuty a procentuálně porovnány.

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 32 - Srovnání výsledných hodnot modelů s jednou a dvěma výztuhami

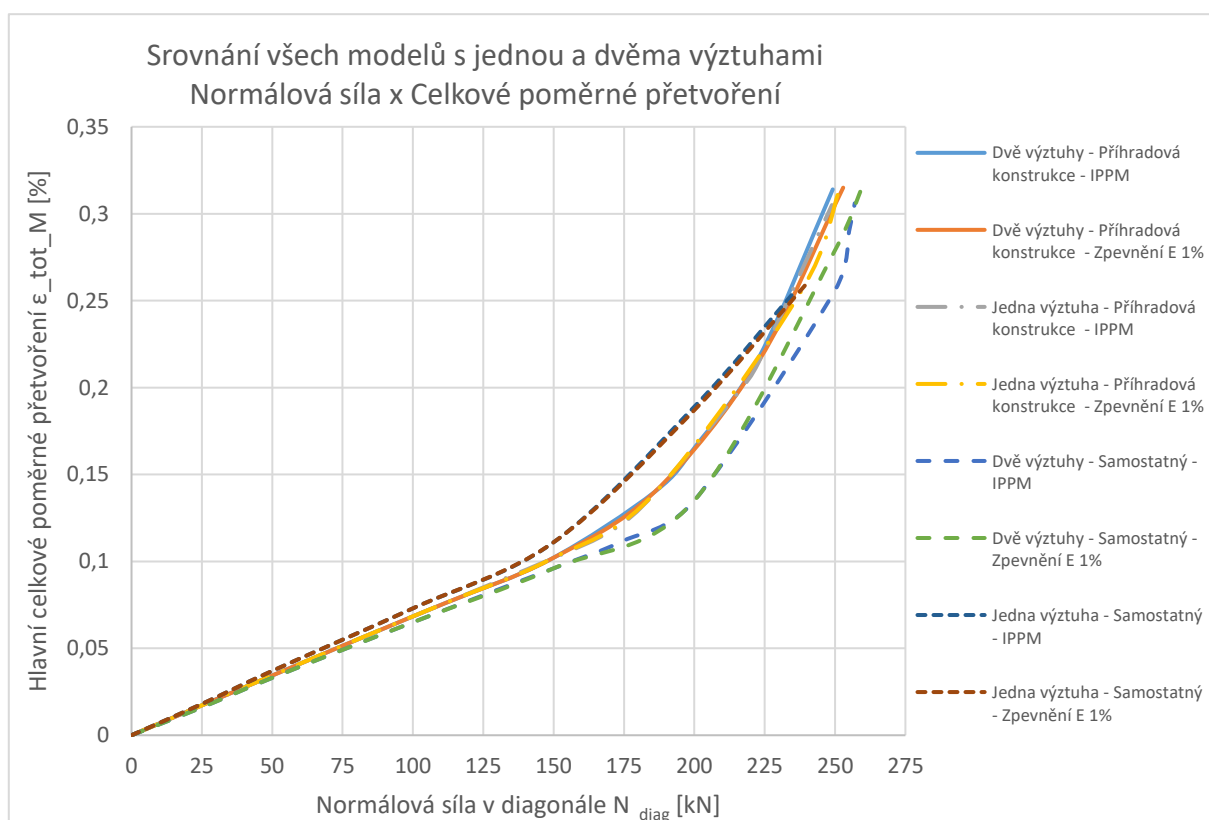
Typ styčnicku	Dle ČSN EN 1993-1- 8	Ideálně pružno- plastický materiál	Zpevnění E 1%	Porovnání s ČSN EN 1993-1-8
N styčník v příhradové konstrukci s jednou výztuhou	334,64 kN	248,91 kN	252,6 kN	25,61/24,51 %
N styčník v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami		249,19 kN	252,9 kN	25,53/25,08 %
Procentuální porovnání numerických modelů s příhradovou konstrukcí				
Nárůst návrhové síly		0,12 %	0,12%	
Samostatný N styčník s jednou výztuhou	334,64 kN	235 kN	240 kN	29,77/28,28 %
Samostatný N styčník se dvěma výztuhami		257 kN	260 kN	23,20/22,30 %
Procentuální porovnání samostatných numerických modelů				
Nárůst návrhové síly		8,56 %	7,69 %	

Druhá výztuha, která je přidána pod taženou diagonálu zvýší únosnost styčnicku, avšak tato únosnost je dána typem modelu. Pro model v celé příhradové konstrukci je nárůst nepatrný a to 0,12 %. Pro samostatný numerický model je nárůst významnější a to 8,56 % respektive 7,69 % pro materiál se zpevněním E 1%. Dalším prvkem, který ovlivní druhá výztuha je oblast plastického přetvoření. Pro model s celou příhradovou konstrukcí se oblast nemění a zůstává na stěně spodního nosíku, avšak pro samostatný model je oblast posunuta z tažené diagonály na stěnu nosíku. Viz Obrázek 76 a 77.



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 29 - Silově-deformační křivky všech modelů s jednou a dvěma výztuhami



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 30 - Srovnání všech modelů s jednou a dvěma výztuhami

Co se týče Grafu 29, kde jsou zobrazeny silově deformační křivky, je minimální rozdíl mezi jednotlivými křivkami pro model v příhradové konstrukci a samostatný numerický model, avšak rozdíl mezi styčником s jednou a dvěma výztuhami je znatelný.

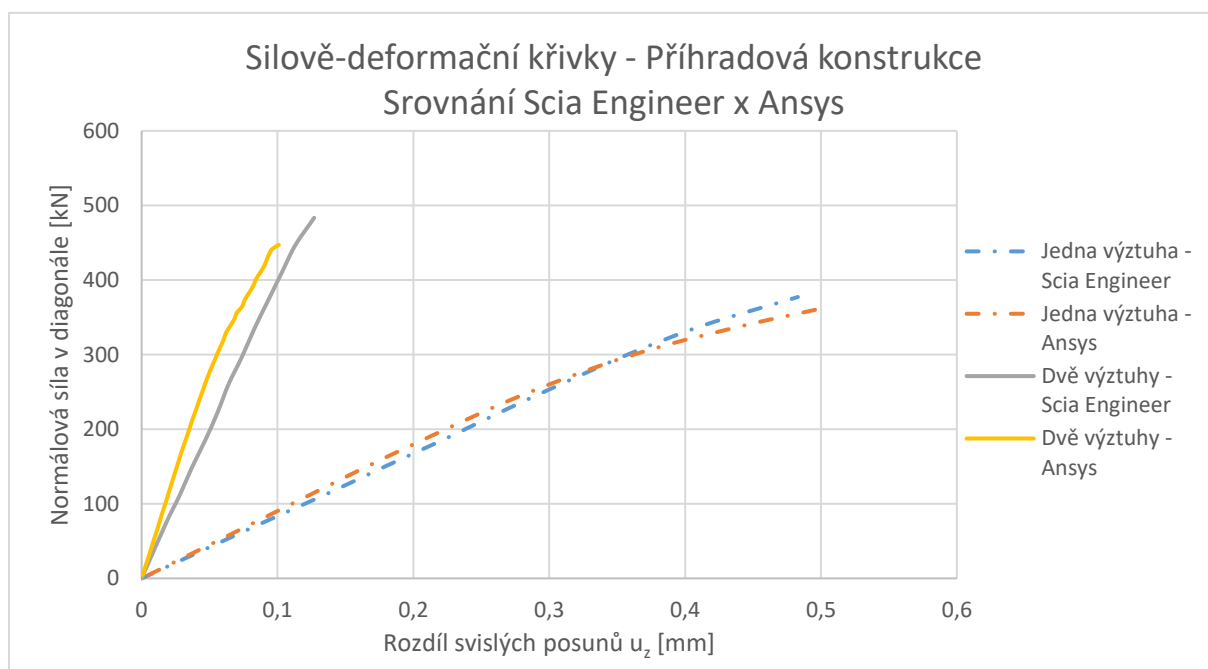
DIPLOMOVÁ PRÁCE

V Grafu 30, který je závislý na normálové síle v diagonále a celkovém poměrném přetvoření lze vidět rozdíly mezi jednotlivými modely. Pro samostatný model s jednou výztuhou vychází z analýzy v porovnání s ostatními modely největší celkové poměrné přetvoření, kdežto pro samostatný model s dvěma výztuhami jsou tyto přetvoření nejmenší. Model s příhradovou konstrukcí vychází právě mezi těmito dvěma křivkami, prakticky bez rozdílu, zda jde o model s jednou či dvěma výztuhami.

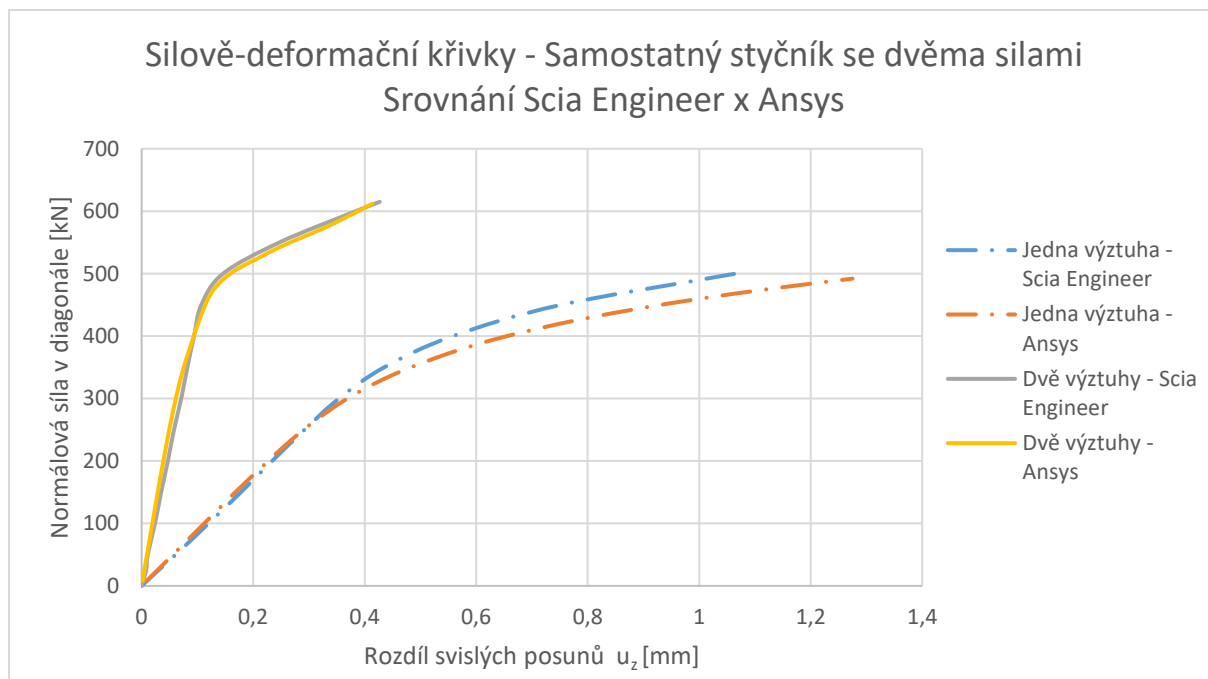
Při zhodnocení všech výsledků těchto modelů lze konstatovat, že přidáním druhé výztuhy lze zajistit menší plastické deformace či celkové poměrné přetvoření, jak je uvedeno v Grafech 29 a 30, ale na výslednou návrhovou sílu v diagonále má tato výztuha vliv malý.

b) Srovnání výsledků s programem Ansys

Hodnoty získány pro porovnání s programem Ansys z [7].



Graf 31 - Graf silově-deformačních křivek srovnání Scia engineer a Ansys pro model celé příhradové konstrukce s jednou a dvěma výztuhami

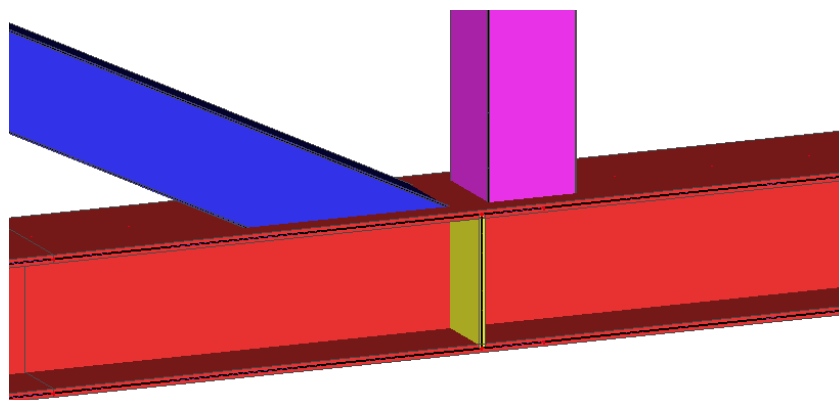


Graf 32 - Graf silově-deformačních křivek srovnání Scia engineer a Ansys pro samostatný model N styčnicku se dvěma silami s jednou a dvěma výztuhami

Z výpočtového modelu celé příhradové konstrukce je z Grafu 31 patrné, že výpočet z programu Ansys je tužší, tedy nárůst deformace v poměru s normálovou silou v diagonále je menší, než tomu je v případě skořepinového modelu z programu Scia Engineer. V případě druhého modelu samostatného N styčnicku je rozdíl mezi jednotlivými výpočtovými programy minimální, tento rozdíl je zobrazen v Grafu 32.

6.5. Výsledky analýzy N styčnicku s jednou výztuhou se změnou pozice

V Kapitole 6.4, kde byly řešeny numerické modely, se ukázalo, že poměrné plastické přetvoření se tvoří na horní části pásnice spodního nosníku. Proto v této kapitole jsou upraveny výztuhy N styčnicku a to tak, že jedna výztuha je odstraněna a druhá je právě posunuta do oblasti plastického přetvoření. Tato úprava bude mít vliv na oblast plastických přetvoření, které se posunou do jiné oblasti viz výsledky níže, nicméně návrhová síla v diagonále bude větší.



Obrázek 78 - Model N styčnicku s jednou výztuhou v jiné pozici

Rozměry výztuhy nejsou nijak měněny a jsou stejné jak v přechozích výpočtech. Výztuha byla posunuta doprostřed světlé vzdálenosti mezi diagonálu a svislici N styčnicku.

a) Model 1 – Výsledky N styčnicku v příhradové konstrukci

Tabulka 33 - Výsledné hodnoty N styčnicku v příhradové konstrukci s jednou výztuhou v jiné pozici

Ideálně pružno-plastický materiál				
N_diag [kN]	σ [MPa]	ε _{pl_M+} [%]	ε _{pl_M-} [%]	ε _{tot_M} [%]
74,17	102	0	0	0,049
111,29	153,1	0	0	0,073
148,44	204,2	0	0	0,097
178,17	234,9	0,01	0,026	0,122
185,6	235	0,019	0,036	0,13
222,77	235	0,079	0,102	0,189
259,86	235	0,171	0,191	0,279
265,04	235	0,187	0,209	0,295
274,62	235	0,222	0,247	0,330

Podmínka plastického přetvoření:

$$\varepsilon_{pl,celk} = \frac{\varepsilon_{pl_M+} + \varepsilon_{pl_M-}}{2} = \frac{18,7 + 20,9}{2} = 19,8 = 0,198 \%$$

$$\varepsilon_{pl,celk} = 0,198 \% \leq \varepsilon_{pl} = 0,2\%$$

VYHOVÍ

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 34 - Výsledné hodnoty N styčnicku v příhradové konstrukci s jednou výztuhou v jiné pozici se zpevněním

Pružno-plastický materiál se zpevněním E 1%				
N_diag [kN]	σ [MPa]	ε _{pl_M+} [%]	ε _{pl_M-} [%]	ε _{tot_M} [%]
74,17	102	0	0	0,049
111,29	153,1	0	0	0,073
148,44	204,2	0	0	0,097
185,6	235,3	0,019	0,036	0,13
222,7	236,6	0,077	0,1	0,188
259,87	238,6	0,162	0,181	0,272
267,26	239,1	0,183	0,204	0,293
268,73	239,2	0,188	0,209	0,298
274,63	239,7	0,207	0,229	0,317

Podmínka plastického přetvoření:

$$\varepsilon_{pl,celk} = \frac{\varepsilon_{pl_M+} + \varepsilon_{pl_M-}}{2} = \frac{18,8 + 20,9}{2} = 19,85 = 0,199 \%$$

$$\varepsilon_{pl,celk} = 0,199 \% \leq \varepsilon_{pl} = 0,2\%$$

VYHOVÍ

Tabulka 35 - Porovnání výsledků s výpočty N styčnicku s jednou výztuhou dle normy [6]

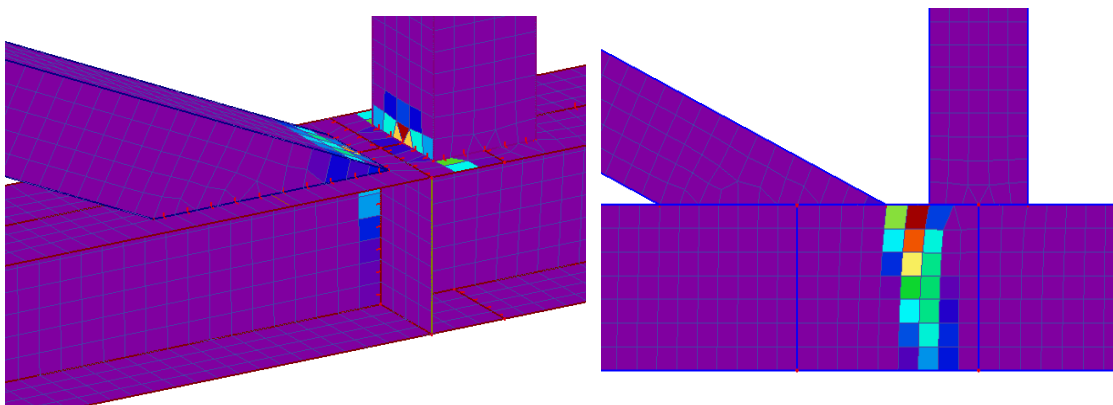
Typ styčnicku	Dle ČSN EN 1993-1-8	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
N styčnick v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami	334,64 kN	265,04 kN	268,73 kN
Pokles návrhové síly		20,80 %	19,69 %

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 36 - Porovnání návrhových normálových sil dle numerických modelů s příhradovou konstrukcí

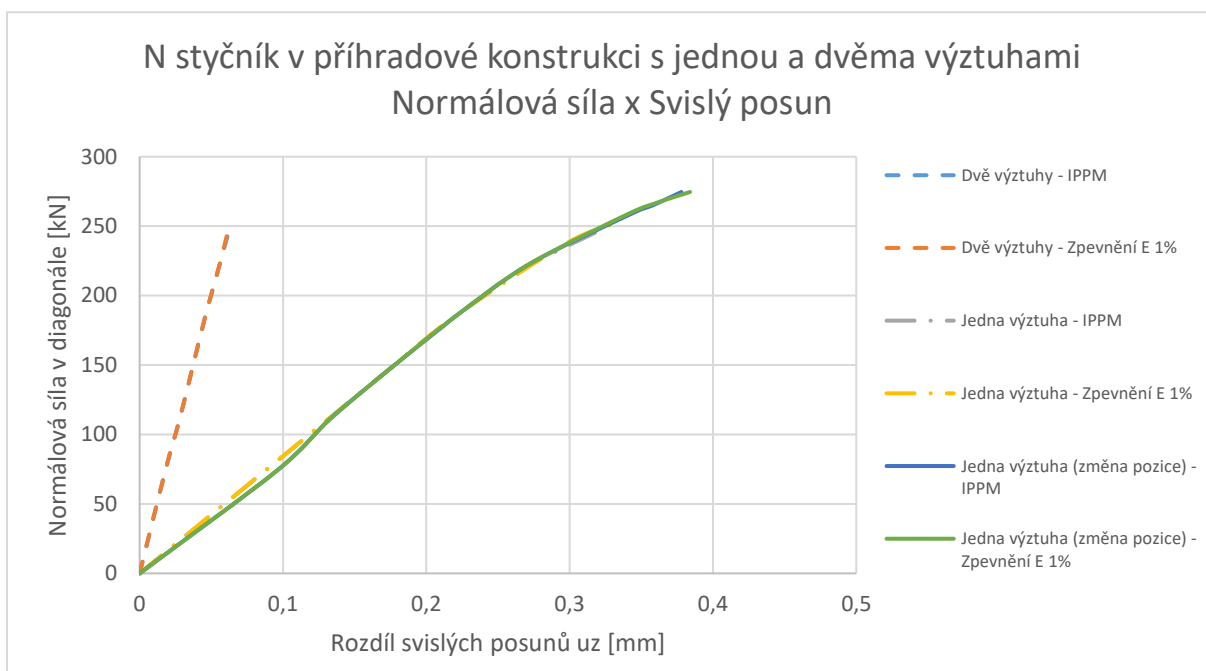
Typ styčnicku	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
N styčník v příhradové konstrukci s jednou výztuhou	248,91 kN	252,6 kN
N styčník v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami	249,19 kN	252,9 kN
N styčník v příhradové konstrukci s jednou výztuhou v jiné pozici	265,04 kN	268,73 kN
Nárůst návrhové síly v diagonále	6,08 % / 5,98 %	6,00 % / 5,89 %

Posunutím výztuže do oblasti tvorby plastických poměrných deformací, které byly známy z předchozích analýz, došlo ke zvýšení návrhové normálové síly v diagonále o 6,0 %.



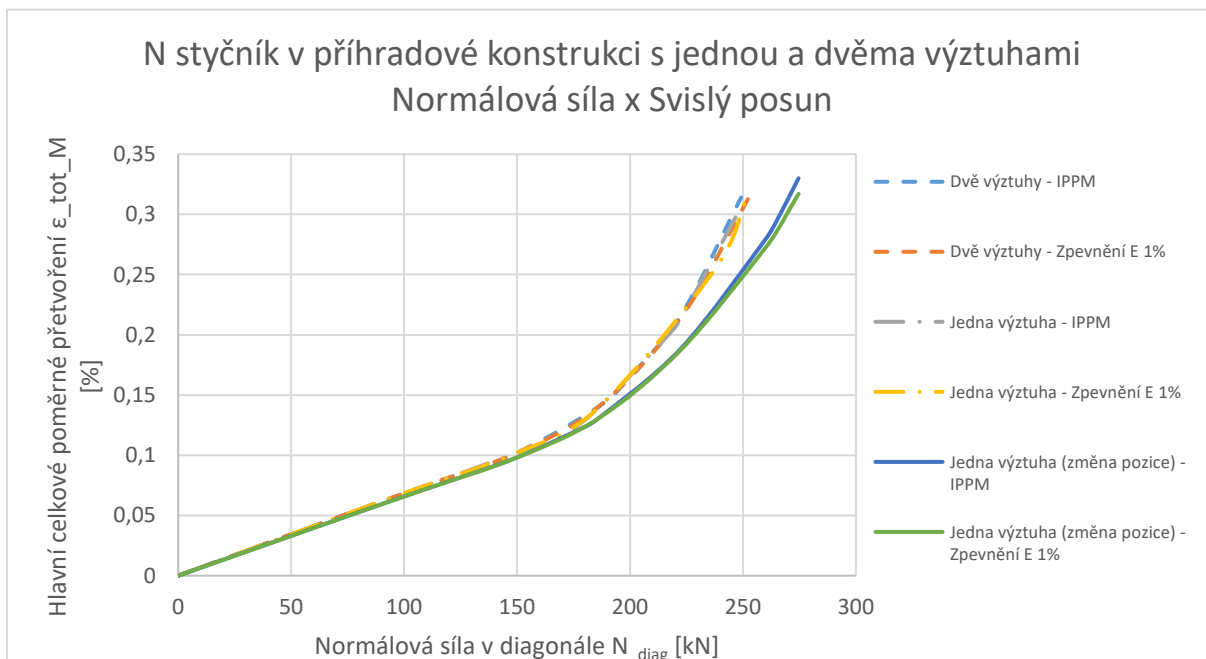
Obrázek 79 - Plastické přetvoření 0,2% N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami a) styčník s jednou výztuhou se změnou pozice b) styčník s dvěma výztuhami

Jak už bylo zmíněno výše, oblast plastického přetvoření se posunula z pásnice spodního nosníku na svislici z důvodu posunutí výztuhy právě do oblasti, kde se plastické přetvoření vyskytovalo. Obrázek 79 platí pro materiál ideálně pružno-plastický, tak i pro materiál se zpevněním E 1%. Rovněž pro oba povrchy plastického přetvoření.



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 33 - Srovnání silově-deformačních křivek N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 34- Srovnání N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami na základně poměrném přetvoření a normálové síle v diagonále

b) Model 2 – Výsledky samostatného N styčnicku

Tabulka 37 - Výsledné hodnoty samostatného N styčnicku s jednou výztuhou v jiné pozici

Ideálně pružno-plastický materiál				
F [kN]	σ [MPa]	ε_{pl_M+} [%]	ε_{pl_M-} [%]	ε_{tot_M} [%]
25	35,4	0	0	0,017
50	70,4	0	0	0,034
100	139,3	0	0	0,066
150	207,7	0	0,007	0,099
200	234,9	0,047	0,081	0,158
250	235	0,119	0,17	0,231
260	235	0,136	0,184	0,246
270	235	0,163	0,199	0,273
275	235	0,178	0,208	0,289
277	235	0,187	0,212	0,297
280	235	0,203	0,218	0,313

* F – Síla v diagonále

Podmínka plastického přetvoření:

$$\varepsilon_{pl,celk} = \frac{\varepsilon_{pl_M+} + \varepsilon_{pl_M-}}{2} = \frac{18,7 + 21,2}{2} = 19,95 = 0,199 \%$$

$$\varepsilon_{pl,celk} = 0,199 \% \leq \varepsilon_{pl} = 0,2\%$$

VYHOVÍ

Tabulka 38 - Výsledné hodnoty samostatného N styčnicku s jednou výztuhou v jiné pozici se zpevněním

Pružno-plastický materiál se zpevněním E 1%				
F [kN]	σ [MPa]	ε_{pl_M+} [%]	ε_{pl_M-} [%]	ε_{tot_M} [%]
25	35,4	0	0	0,017
50	70,4	0	0	0,034
100	139,3	0	0	0,066
150	207,7	0	0,007	0,099
200	235,8	0,046	0,079	0,157
250	237,1	0,116	0,165	0,228
280	238,6	0,185	0,213	0,298

* F – Síla v diagonále

Podmínka plastického přetvoření:

$$\varepsilon_{pl,celk} = \frac{\varepsilon_{pl,M+} + \varepsilon_{pl,M-}}{2} = \frac{18,5 + 21,3}{2} = 19,9 = 0,19 \%$$

$$\varepsilon_{pl,celk} = 0,19 \% \leq \varepsilon_{pl} = 0,2\%$$

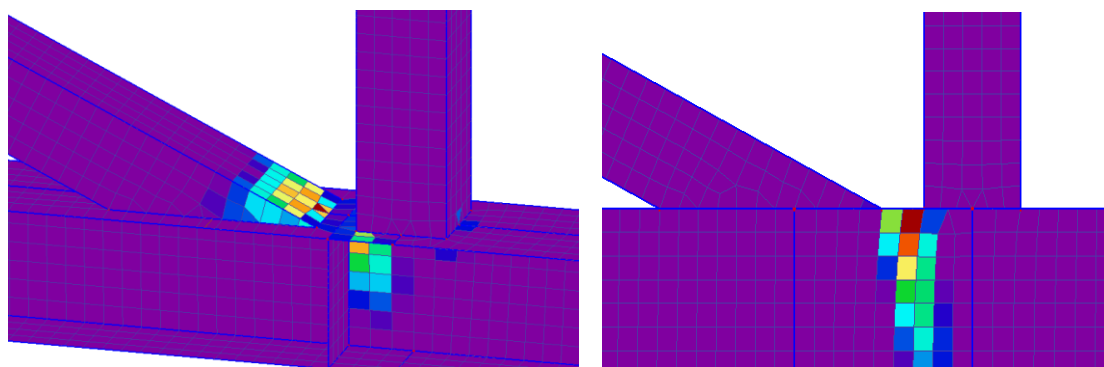
VYHOVÍ

Tabulka 39 - Porovnání výsledků s výpočty N styčnicku s jednou výztuhou dle normy [6]

Typ styčnicku	Dle ČSN EN 1993-1-8	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
N styčnick v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami	334,64 kN	277 kN	280 kN
Pokles návrhové síly		17,22 %	16,32 %

Tabulka 40 - Porovnání návrhových normálových sil dle numerických modelů samostatného styčnicku

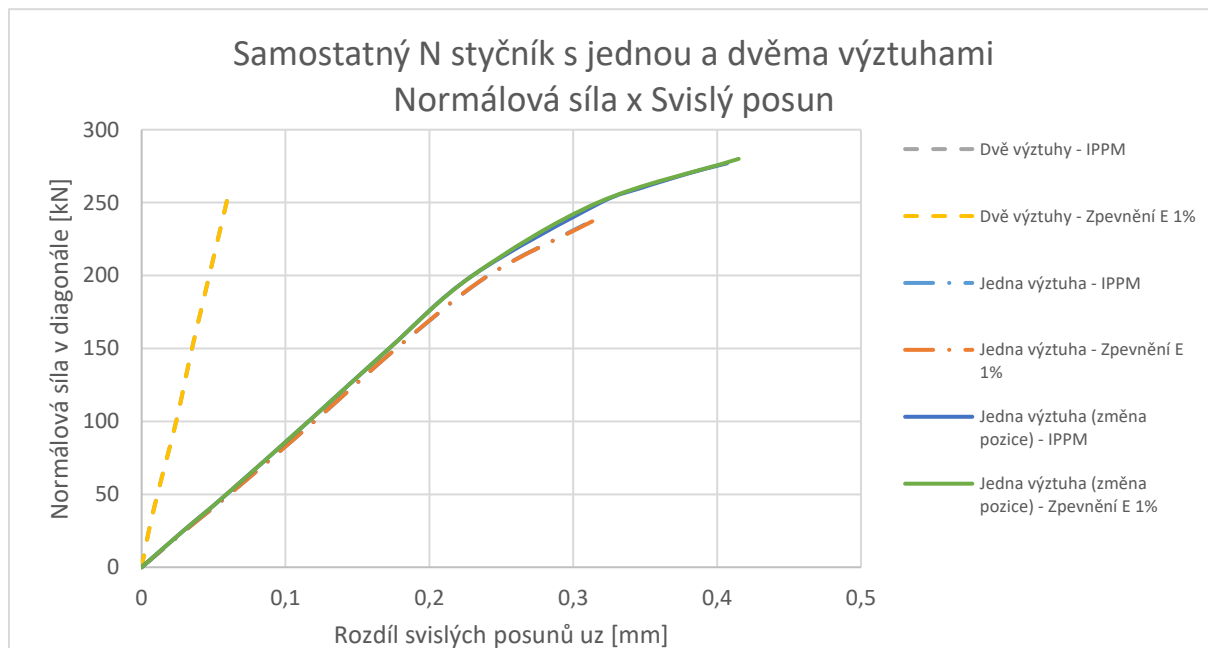
Typ styčnicku	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%
Samostatný N styčnick s jednou výztuhou	235 kN	240 kN
Samostatný N styčnick se dvěma výztuhami	257 kN	260 kN
Samostatný N styčnick s jednou výztuhou v jiné pozici	277 kN	280 kN
Nárůst návrhové síly v diagonále	15,16 % / 7,22 %	14,28 % / 7,14 %



Obrázek 80 - Plastické přetvoření 0,2% samostatného N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami
a) styčnick s jednou výztuhou se změnou pozice b) styčnick s dvěma výztuhami

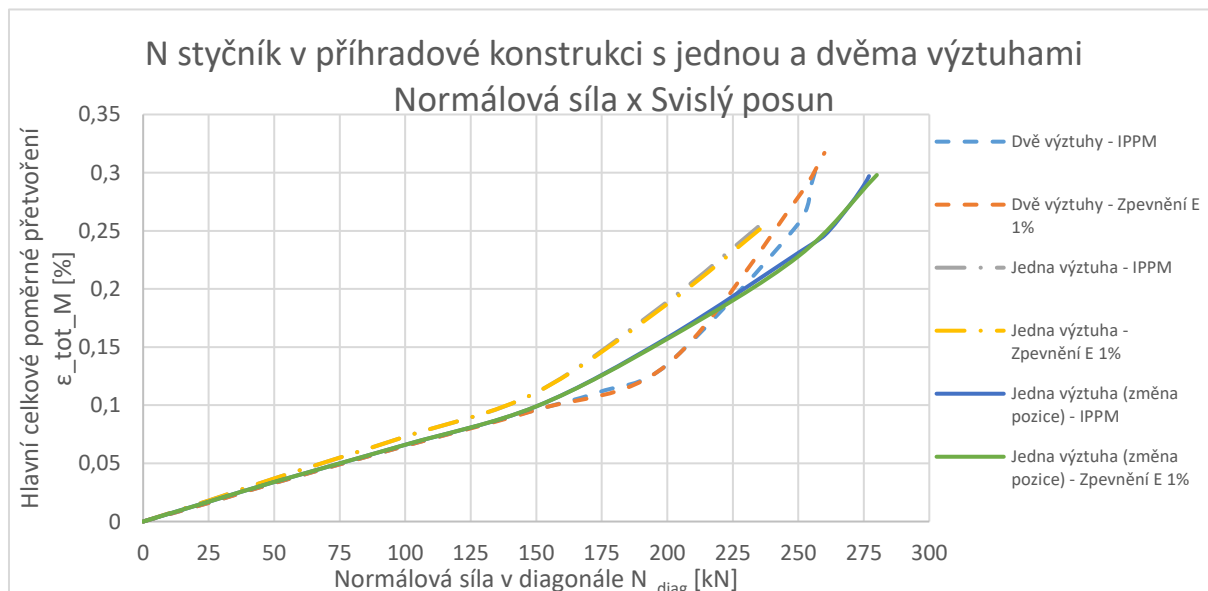
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Výsledky z Obrázku 80a) platí jak pro ideálně pružno-plastický materiál, tak i pro materiál se zpevněním. Ve srovnání s obrázkem 79, kde se po změně polohy výztuhy přesunula oblast plastického přetvoření do svislice, v numerickém modelu samostatného styčnicku se tato oblast vrátila do diagonály, obdobně jako v analýze s jednou výztuhou, která byla pod svislicí viz Obrázek 71.



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 35 - Srovnání silově-deformačních křivek N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 36- Srovnání N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami na základě poměrném přetvoření a normálové síle v diagonále

6.5.1. Vyhodnocení a srovnání výsledků

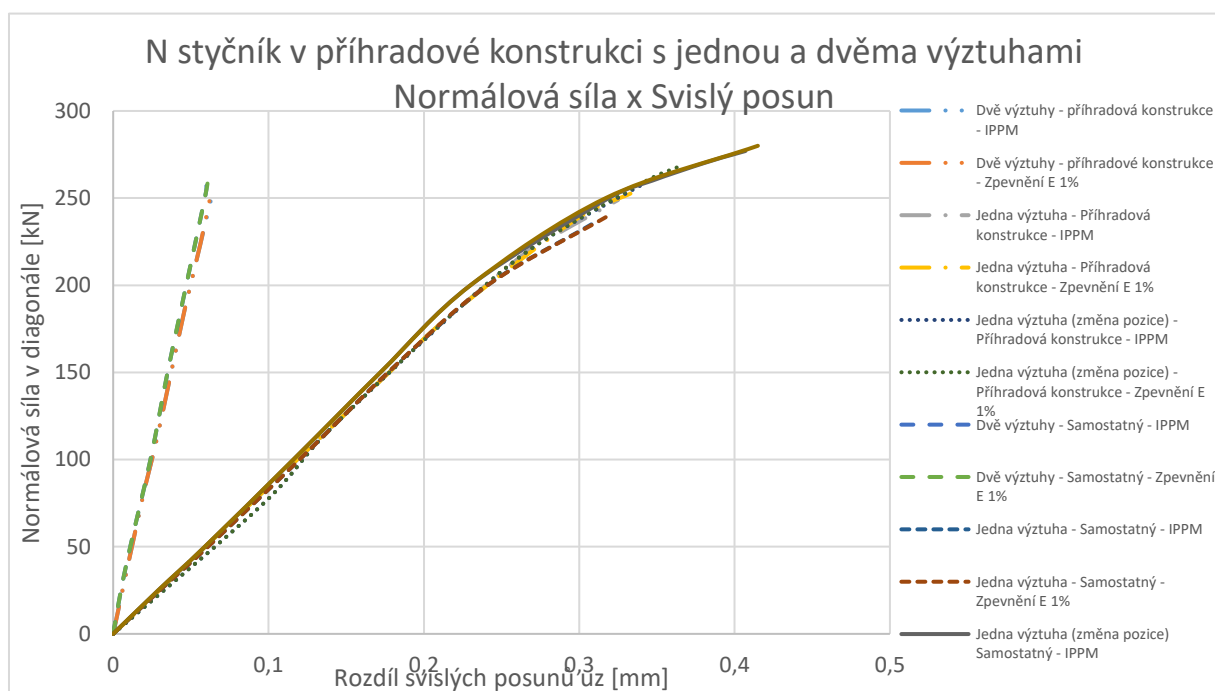
Z výsledků z kapitol 6.3 a 6.4 byla zjištěna oblast plastických poměrných deformací, která tvoří hlavní podmínku pro posouzení těchto modelů dle normy [4]. Z tohoto důvodu byla výztuha umístěna do této oblasti. Výsledkem je tedy zvýšení návrhové normálové síly v diagonále a zjištění, že postačí pouze jedna vhodně umístěna výztuha pro zvýšení únosnosti styčnicku.

Oblast plastického přetvoření se posunula buď do svislice - Obrázek 79, případně do diagonály Obrázek 80. Na těchto prvcích už by bylo tvoření plastických oblastí poměrně těžké omezit, proto lze konstatovat, že poloha této výztuhy ve srovnání s ostatními případy je vhodná a efektivní.

Tabulka 41 - Srovnání výsledných hodnot modelů s jednou a dvěma výztuhami

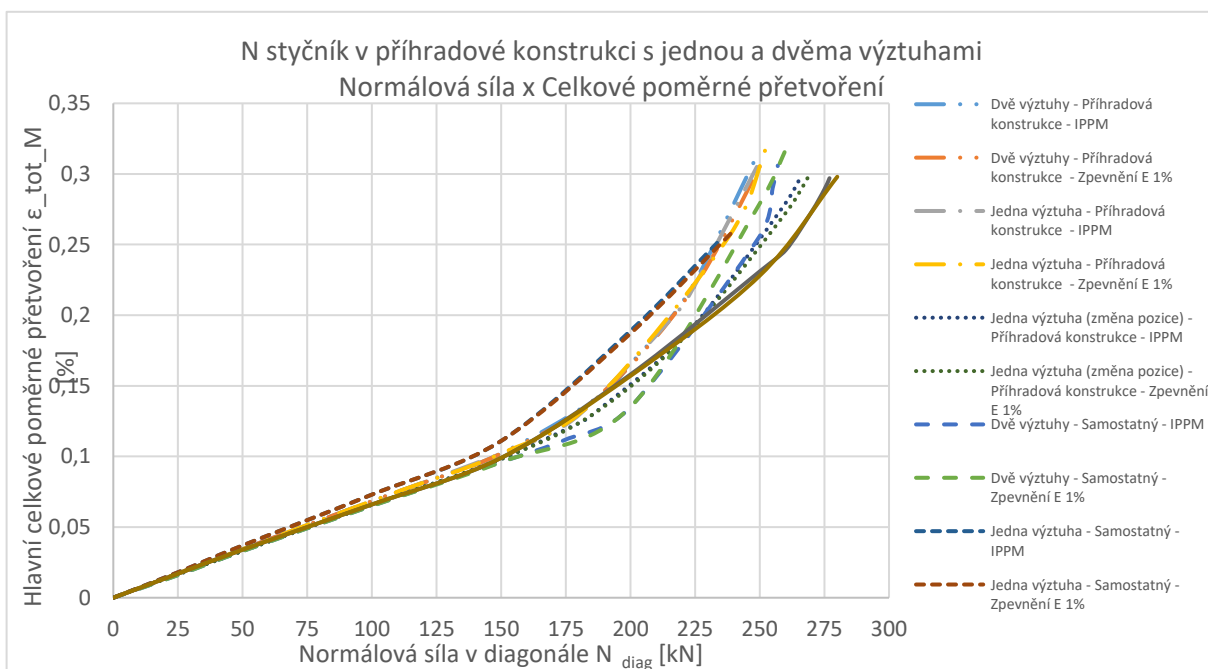
Typ styčnicku	Dle ČSN EN 1993-1-8	Ideálně pružno-plastický materiál	Zpevnění E 1%	Porovnání s ČSN EN 1993-1-8
N styčnick v příhradové konstrukci s jednou výztuhou	334,64 kN	248,91 kN	252,6 kN	25,61/24,51 %
N styčnick v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami		249,19 kN	252,9 kN	25,53/25,08 %
N styčnick v příhradové konstrukci s jednou výztuhou se změnou pozice		265,04 kN	268,73 kN	20,80/19,69 %
Procentuální porovnání numerických modelů s příhradovou konstrukcí				
Nárůst návrhové síly		6,08/5,98 %	6,00/5,89 %	
Samostatný N styčnick s jednou výztuhou	334,64 kN	235 kN	240 kN	29,77/28,28 %
Samostatný N styčnick se dvěma výztuhami		257 kN	260 kN	23,20/22,30 %
Samostatný N styčnick s jednou výztuhou se změnou pozice		277 kN	280 kN	17,22/16,32 %
Procentuální porovnání samostatných numerických modelů				
Nárůst návrhové síly		15,16/7,22 %	14,28/7,14 %	

Z Tabulky 41 je patrné, že změna polohy výztuhy má poměrně velký vliv na návrhovou sílu v diagonále právě proto, že byla omezena oblast plastické poměrné deformace. Pro numerický model v příhradové konstrukci je nárůst až 6,08 % návrhové síly, pro samostatný model N styčnicku to je 15,16 %.



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 38 - Silově-deformační křivky všech modelů s jednou a dvěma výztuhami



* IPPM – Ideálně pružno-plastický materiál

Graf 37 - Srovnání všech modelů s jednou a dvěma výztuhami

6.6. Závěr analýzy příhradového N styčnicku

Analýza ocelového N styčnicku, která byla provedena v kapitole 6 je porovnávána jak s orientačním výpočtem dle normy [6] tak i jednotlivé modely mezi sebou.

Jak už bylo zmíněno na začátku této kapitoly výpočet dle normových vztahů je pouze orientační, jelikož daný styčnick nesplňuje zásady pro návrh styčnicku dle normy [6]. Tento problém a výpočet je uveden v Kapitole 6.2. Z normového výpočtu vychází, že nejslabším místem styčnicku je porušení mezipásového prutu a proto tato návrhová síla byla vybrána pro porovnávání výsledků z numerických modelů. Všechny zjištěné výsledky z výpočtu v programu Scia Engineer byly menší než normový výpočet, největší rozdíl vychází v modelu samostatného N styčnicku s jednou výztuhou a to 29,77 %, více viz Kapitola 6.3.b). Všechny výsledky s porovnáním jsou uvedeny v Tabulce 41.

Ocelový styčnick byl navržen a spočten ve třech různých variantách, které se lišily použitím výztuh mezi pásnicemi spodního nosníku příhradové konstrukce. Prvním modelem byl styčnick s výztuhou pod svislicí u druhého byla přidána výztuha pod diagonálu a třetím modelem byl styčnick s jednou výztuhou v oblasti výskytu plastických poměrných přetvoření, která byla zjištěna z prvních dvou modelů. Zmíněný poslední model ukázal, že vhodně zvolena výztuha měla příznivější vliv na návrhovou normálovou sílu než předchozí dva modely. Největší nárůst normálové síly v diagonále byl zaznamenán o 15,16 % viz Kapitola 6.5.b). Všechny výsledky těchto modelů jsou rovněž uvedeny v Tabulce 41.

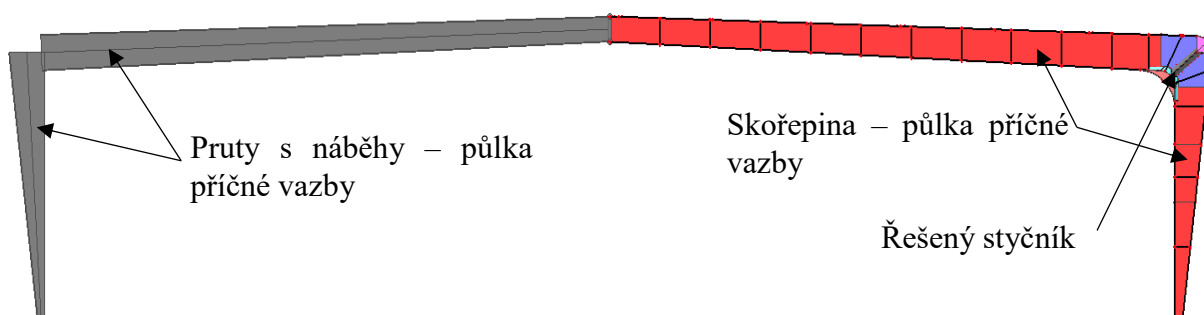
Jako numerický model, který je vhodný pro analýzu tohoto styčnicku se jeví model s příhradovou konstrukcí, z důvodu nejjednodušších zavedení okrajových podmínek a v neposlední řadě ovlivnění styčnicku ostatními prvky konstrukce. Dále jsou v této práci spočteny dva submodely samostatného N styčnicku, u kterých bylo nutné vyřešit okrajové podmínky viz Obrázek 59. Submodely byly zatěžovány jednou silou v diagonále, což se ukázalo jako nepřesné (odlišná oblast plastických poměrných přetvoření a velikost návrhové normálové síly je mnohem větší než u dalších dvou modelů, viz Tabulka 23). Dále dvěma silami, v diagonále a ve spodním pásu viz Obrázek 58 a 59. Tento model se jeví jako více přesný a poměrně shodný s modelem v příhradové konstrukci, ale oblast plastických deformací se liší u modelu s jednou výztuhou, a proto tedy lze předpokládat a považovat numerický model v příhradové konstrukci jako nejvíce přesný a nejvhodnější.

7. Posouzení rámového rohu zimního stadionu v Opavě

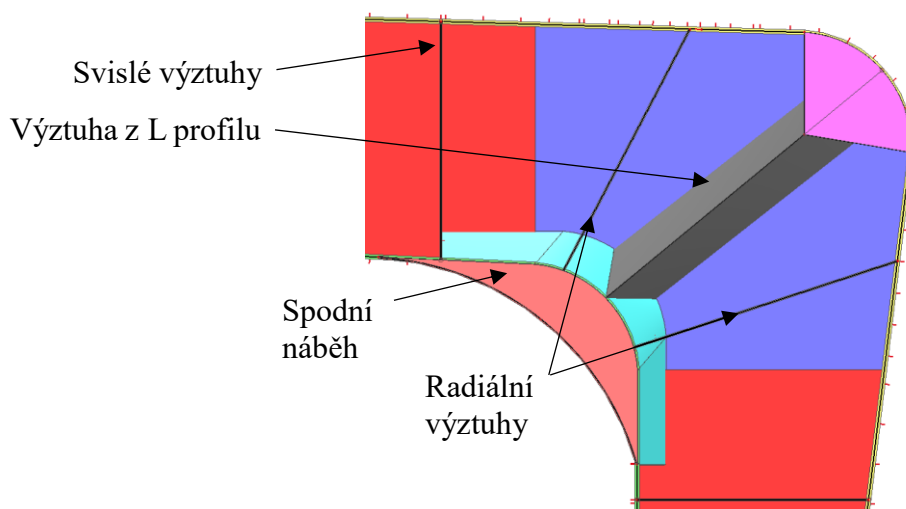
Pro poslední analýzu styčníku, která bude řešena v kapitole 7, byl vybrán ocelový svařovaný rámový roh zimního stadionu v Opavě. Analýza spočívá v zjištění chování řešeného styčníku vzhledem k reálnému zatížení konstrukce a posouzení dle poměrných deformací.



Obrázek 81 - Konstrukce zimního stadionu v Opavě



Obrázek 82 - Numerický mode příčné vazby zimního stadionu



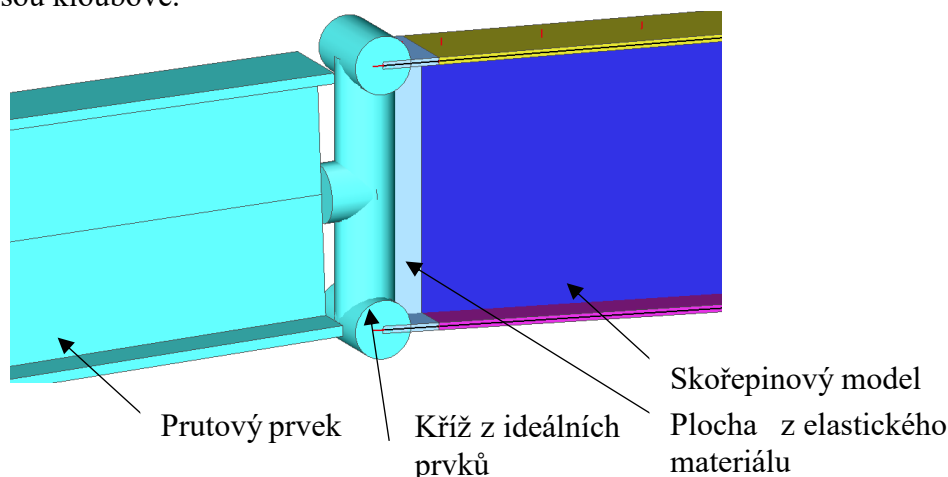
Obrázek 83 - Detail rámového rohu zimního stadionu

7.1. Tvorba numerického modelu rámového rohu

Obdobně jak v předchozích případech, byl model rámového rohu vytvořen v programu AutoCad. Rozdílem, kterým se lišila tvorba tohoto modelu je složitost a různé polohy jednotlivých prvků, proto bylo vhodnější namísto ploch zvolit tvoření např. radiálních výztuh pomocí čar a následně v programu Scia Engineer skořepinu vytvořit ručně.

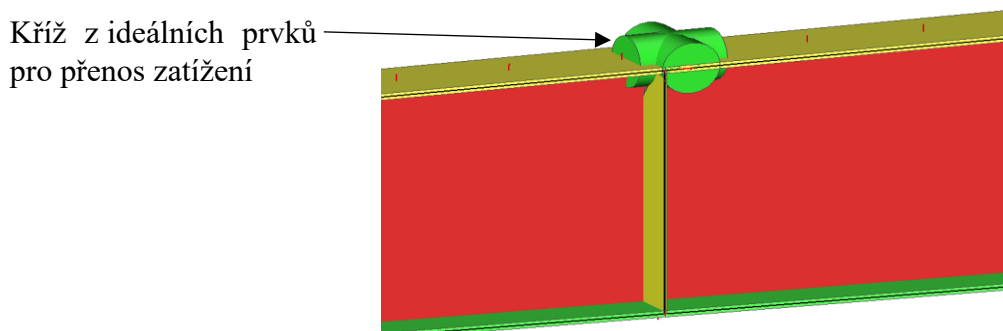
Geometrie nosníku byla převzata z původních výkresů [9]. Reálné vyhotovení rámového rohu se od původního výkresu odlišuje, proto tedy byly všechny odlišnosti zapracovány z výsledků měření přímo na místě, případně odečteno z fotek.

Po importování modelu do programu Scia Engineer a zadání všech tloušťek materiálu je nutné vytvořit druhou polovinu příčné vazby viz Obrázek 82. Druhá polovina je tvořena pruty s náběhy ve sklonu stejném jako skořepinová konstrukce. Podpory jsou kloubové.



Obrázek 84 - Detail napojení příčle z prutu k skořepinovému modelu

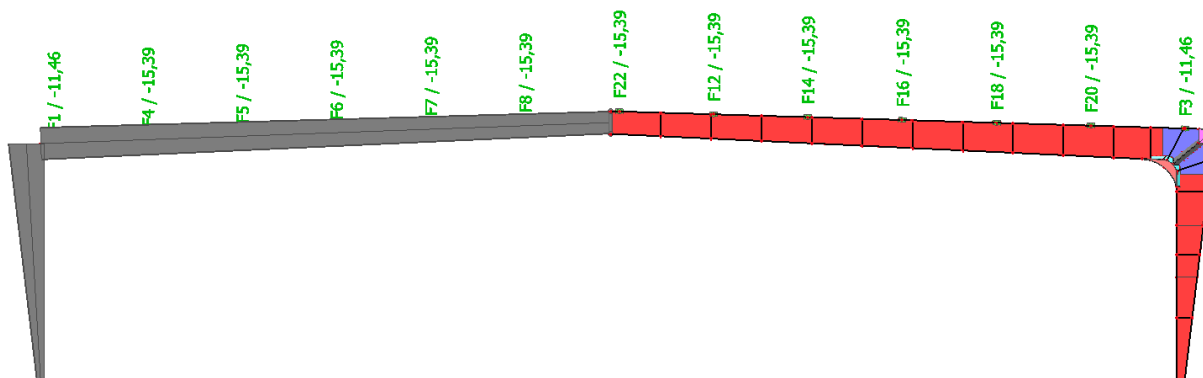
Pro napojení prutu na skořepinový model je vhodné použít kříž z ideálních prutů, aby nedošlo ke zkreslení napětí a deformací v místě napojení. Tyto prvky byly popsány v kapitole 5.2. Dále byla použita plocha z elastického materiálu o délce 200 mm, která převezme hlavní špičky napětí v oblasti napojení obou příčlů.



Obrázek 85 - Detail bodu vložení zatížení

Pásnice příčle a sloupu je šířky 300 mm a tloušťky 25mm, výztuhy tl. 15 mm. Výška příčle je v hřebenu příčné vazby 900 mm v rámovém rohu až 1280 mm. Sloup je kotven kloubovými patkami a jeho šířka je v patě 300 mm, v rámovém rohu 1330 mm. Stěna příčle a sloupu je tvořena plechem o tloušťce 12 mm. Ocel S235. Všechny rozměry převzaty z původní výkresové dokumentace [9].

7.2. Zatížení rámového rohu



Obrázek 86 - Zatěžování příčné vazby rámové konstrukce reakcemi od vaznic

Zatěžování příčle, respektive celé příčné vazby rámové konstrukce je tvořeno reakcemi od vaznic. Zatížení je převzato ze statického posouzení [8]. Vlastní tíha je generována softwarem automaticky.

a) Stálé zatížení od konstrukce střechy

Zatížení je tvořeno reakcemi od vaznic a reakcemi od střešního pláště včetně podhledu.

$$G_k = 11,46 \text{ kN} \quad \dots\dots\dots \text{Reakce od vaznic 1 a 13}$$

$$G_k = 15,39 \text{ kN} \quad \dots\dots\dots \text{Reakce od vaznic 2 až 12}$$

b) Zatížení sněhem

$$S_k = 13,88 \text{ kN} \quad \dots\dots\dots \text{Reakce od vaznic 1 a 13}$$

$$S_k = 21,92 \text{ kN} \quad \dots\dots\dots \text{Reakce od vaznic 2 až 12}$$

c) Zatížení větrem - Příčle

Příčný vítr

$$W_k = -18,44 \text{ kN(sání)} \quad \dots\dots\dots \text{Reakce od vaznice 1}$$

$$W_k = -16,75 \text{ kN(sání)} \quad \dots\dots\dots \text{Reakce od vaznic 2 a 3}$$

$$W_k = -10,77 \text{ kN(sání)} \quad \dots\dots\dots \text{Reakce od vaznice 4}$$

$$W_k = -4,79 \text{ kN (sání)} \quad \dots\dots\dots \text{Reakce od vaznic 5 až 12}$$

$$W_k = +4,79 \text{ kN (tlak)} \quad \dots\dots\dots \text{Reakce od vaznic 5 až 12}$$

$W_k = -3,03 \text{ kN}$ (sání) Reakce od vaznice 13

$W_k = +3,03 \text{ kN}$ (tlak) Reakce od vaznice 13

Podélný vítr

$W_k = -6,43 \text{ kN}$ (sání) Reakce od vaznic 1 a 13

$W_k = -10,15 \text{ kN}$ (sání) Reakce od vaznic 2 až 12

d) Zatížení větrem – Sloup

Příčný vítr

$W_{k,D} = +1,70 \text{ kN/m}$

Podélný vítr

$W_{k,D} = -2,28 \text{ kN/m}$

e) Reakce od okapové vaznice

Podélný vítr

$W_{k,D} = +8,52 \text{ kN}$

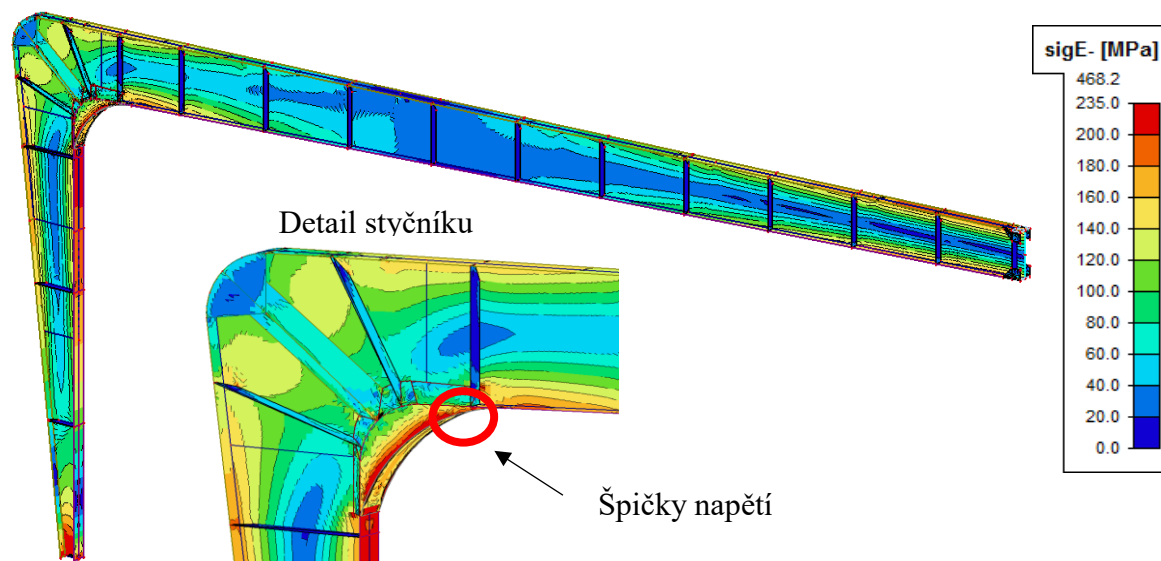
Bylo vytvořeno celkem 62 nelineárních kombinací zatížení a je vybrána jedna, která má největší účinek na konstrukci a která je použita pro návrh styčníku dle normy [4].

Rozhodující kombinace:

NC11(NC1) – Vlastní tíha, Reakce od vaznic (střešní plášť), Reakce od vaznic (sníh), Reakce od vaznic (Příčný vítr - Tlak)

7.3. Výsledky posouzení rámového rohu

V této analýze nebyla hledána maximální únosnost styčníku, nýbrž je posuzován na účinky reálného zatížení zimního stadionu. Zatížení je uvedeno v kapitole 7.2..



Obrázek 87 - Napětí na rámovém rohu při lineárním výpočtu

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Skrze ruční výpočet byla provedena kontrola napětí pod náběhem styčníku. Ohybový moment byl získán z prutového modelu těsně pod náběhem. Pro výpočet napětí byl odečten a spočten průřezový modul v řešeném řezu.

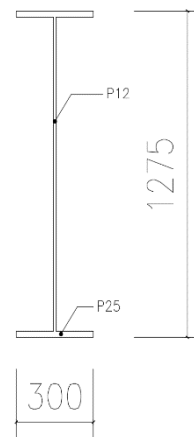
$$M = 2885 \text{ kNm}$$

$$I_y = 7,698 \cdot 10^9 \text{ mm}^4$$

$$W_y = \frac{I_y}{e} = \frac{7,698 \cdot 10^9}{637,5} = 12,075 \cdot 10^6 \text{ mm}^3$$

$$\sigma = \frac{M}{W_y} = \frac{2885 \cdot 10^6}{12,075 \cdot 10^6} = 238,90 \text{ MPa}$$

$$\sigma = 238,90 \text{ MPa} \leq \frac{f_y}{\gamma_{M1}} = \frac{235}{1,0} = 235 \text{ MPa}$$



Obrázek 88 - Průřez sloupu v řešeném místě

Ze skořepinového modelu vychází napětí pod náběhem 240 MPa, rozdíl tedy oproti ručnímu výpočtu je o 1,1 MPa. Dle výpočtu je posudek nevyhovující, ale vzhledem k plastické rezervě průřezu, která se dá stanovit na normou [4] daných 5 % celkových poměrných přetvoření je daný prvek vyhovující. Z výsledků uvedených níže je rezerva poměrných přetvoření dostačující.

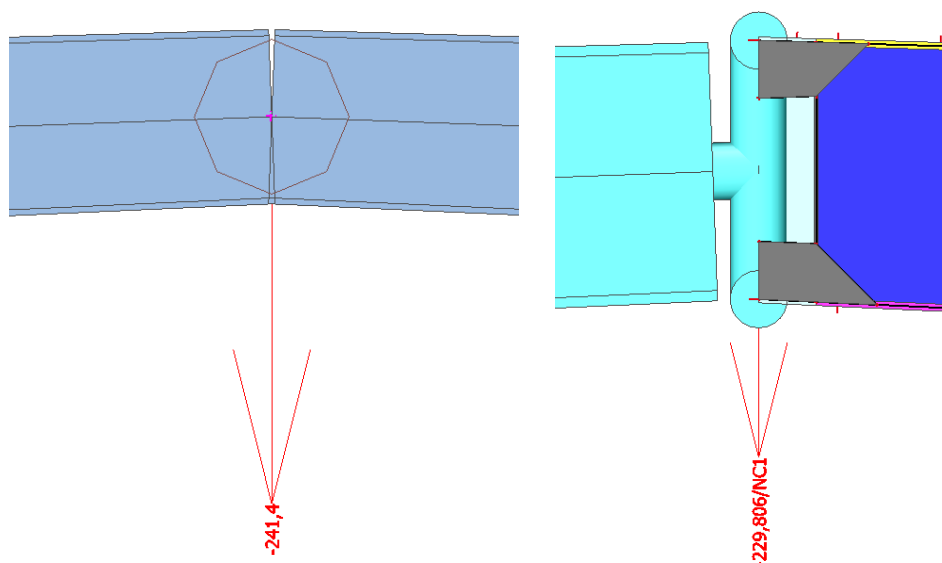
a) Výsledky pro ideálně pružno-plastický materiál

Tabulka 42 - Porovnání posunů u_z skořepinového modelu a prutového modelu

Zatížení	Skořepinový model u_z [mm]	Prutový model u_z [mm]	Rozdíl [%]
NC1 (Únosnost)	229,81	241,4	4,80
NC2 (Použitelnost)	160,05	168,4	4,95
NC3 (MSP-proměnné zatížení)	109,96	115,8	5,04

* NC1 = NC11

Při porovnání výsledků z prutového a skořepinového modelu vyplývá, že skořepinový model je tužší o 4,8 – 5,04 %. Tento rozdíl je pravděpodobně způsobený použitím výztužných prvků na příčli a sloupu, což v prutovém modelu nemůže být zahrnuto.

Obrázek 89 - Svislé deformace u_z prutového a skořepinového modelu pro zatížení NC1

Tabulka 43 - Poměrná přetvoření rámového rohu s ideálně pružno-plastickým materiálem

Zatížení	ε_{tot_M+} [%]	ε_{tot_M-} [%]	ε_{pl_M+} [%]	ε_{pl_M-} [%]
NC1	0,173	0,174	0,062	0,062

Podmínka celkového poměrného přetvoření:

$$\varepsilon_{tot,celk} = \frac{\varepsilon_{tot_M+} + \varepsilon_{tot_M-}}{2} = \frac{0,173 + 0,174}{2} = 0,1735 \%$$

$$\varepsilon_{tot,celk} = 0,1735 \% \leq \varepsilon_{tot} = 5,0 \% \text{ (rezerva 4,82 \%)}$$

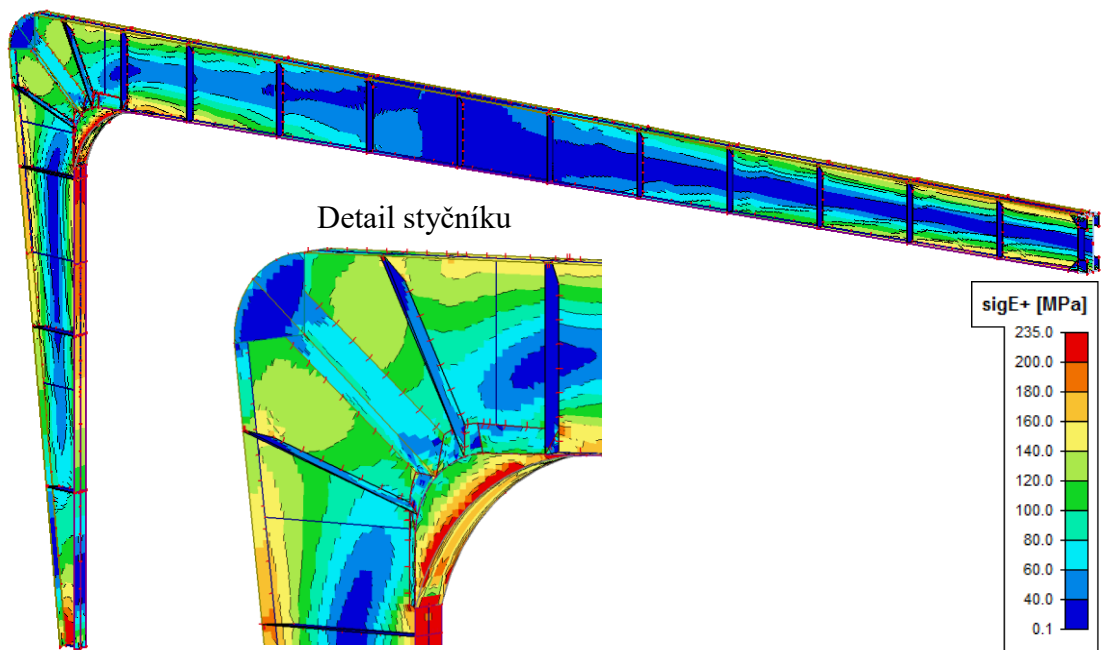
VYHOVÍ

Podmínka plastického přetvoření:

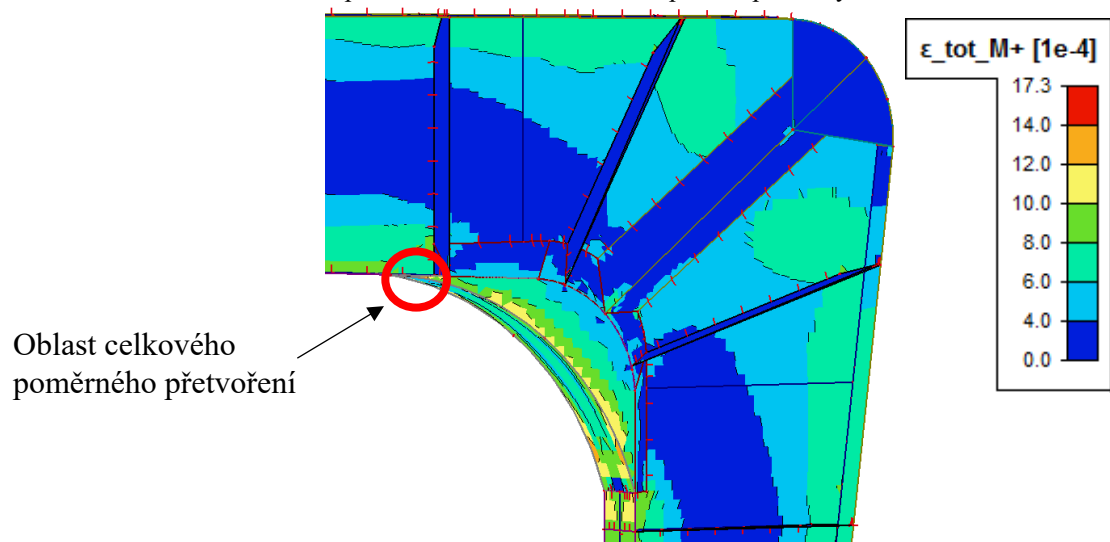
$$\varepsilon_{pl,celk} = \frac{\varepsilon_{pl_M+} + \varepsilon_{pl_M-}}{2} = \frac{0,062 + 0,062}{2} = 0,062 \%$$

$$\varepsilon_{pl,celk} = 0,062 \% \leq \varepsilon_{tot} = 0,2 \% \text{ (rezerva 0,138 \%)}$$

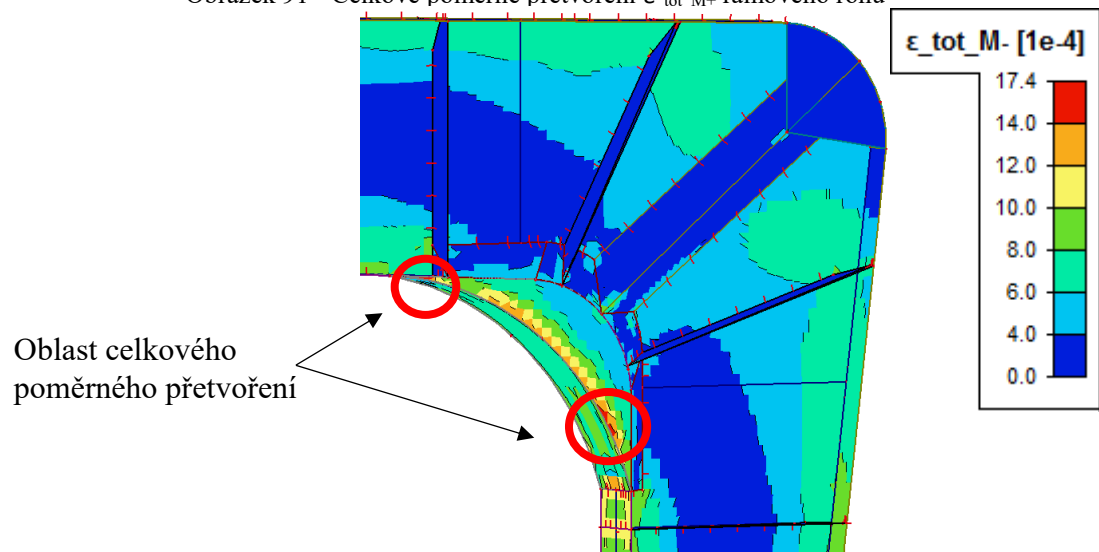
VYHOVÍ



Obrázek 90 – Napětí na rámovém rohu ideálně pružno-plastický materiál

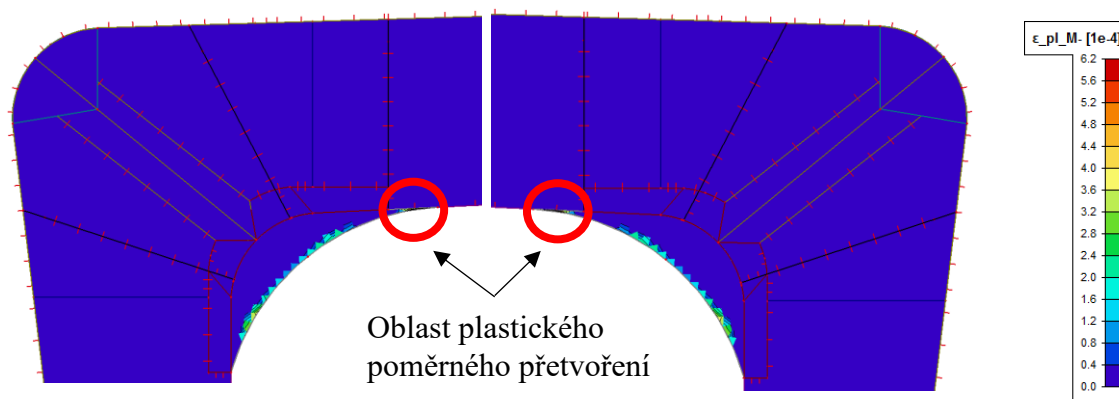


Obrázek 91 - Celkové poměrné přetvoření ϵ_{tot_M+} rámového rohu



Obrázek 92 - Celkové poměrné přetvoření ϵ_{tot_M-} rámového rohu

Meze kluzu je dosaženo pod náběhem na spodní pásnici sloupu a v oblasti svaru náběhu se stěnou náběhu viz Obrázek 89. Z Tabulky 43 je patrné, že reálné zatížení nezpůsobí dosažení limitních poměrných přetvoření, která jsou dána normou [4]. Rezervy pro tyto hodnoty jsou 4,82 %, respektive 0,138 % pro plastické poměrné přetvoření. Největší přetvoření se vytváří v oblasti spodního náběhu styčnicku viz Obrázky 90 a 91.



Obrázek 93 - Plastické poměrné přetvoření rámového rohu a) ε_{pl_M+} b) ε_{pl_M-} .

Obdobně jak u celkového poměrného přetvoření i u plastického, je oblast přetvoření vytvořena na spodním náběhu, konkrétně ve styku spodního náběhu s pásnicí příčle viz Obrázek 92. Pro oba povrchy jsou plastická přetvoření totožná.

b) Výsledky pro pružno-plastický materiál se zpevněním

Přidáním zpevnění do výpočtu je možné zjistit výsledné napětí, kterého je dosaženo za meze kluzu při reálném zatížení zimního stadionu.

Tabulka 44 - Porovnání posunů u_z skořepinového modelu bez a se zpevněním a prutového modelu

Zatížení	Skořepinový model u_z [mm]	Prutový model u_z [mm]	Rozdíl [%]
NC1 (Únosnost)	229,81 (229,80)	241,4	4,80
NC2 (Použitelnost)	160,05 (160,05)	173,9	7,96
NC3 (MSP-proměnné zatížení)	109,96 (109,96)	121,3	9,34

* NC1 = NC11; hodnoty v závorce pro materiál se zpevněním

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zpevnění nemá žádný vliv na výsledný průhyb uprostřed příčné vazby rámu.

Proto tedy výsledné rozdíly s prutovým modelem jsou totožné.

Tabulka 45 - Poměrná přetvoření rámového rohu s pružno-plastickým materiálem bez a se zpevněním

Zatížení	ε_{tot_M+} [%]	ε_{tot_M-} [%]	ε_{pl_M+} [%]	ε_{pl_M-} [%]
NC1(IPPM)	0,173	0,174	0,062	0,062
NC1(se zpevněním)	0,173	0,173	0,061	0,062

* NC1 = NC11; IPPM – ideálně pružno-plastický materiál

Podmínka celkového poměrného přetvoření:

$$\varepsilon_{tot,celk} = \frac{\varepsilon_{tot_M+} + \varepsilon_{tot_M-}}{2} = \frac{0,173 + 0,173}{2} = 0,173 \%$$

$$\varepsilon_{tot,celk} = 0,173 \% \leq \varepsilon_{tot} = 5,0 \% \text{ (rezerva 4,827 \%)}$$

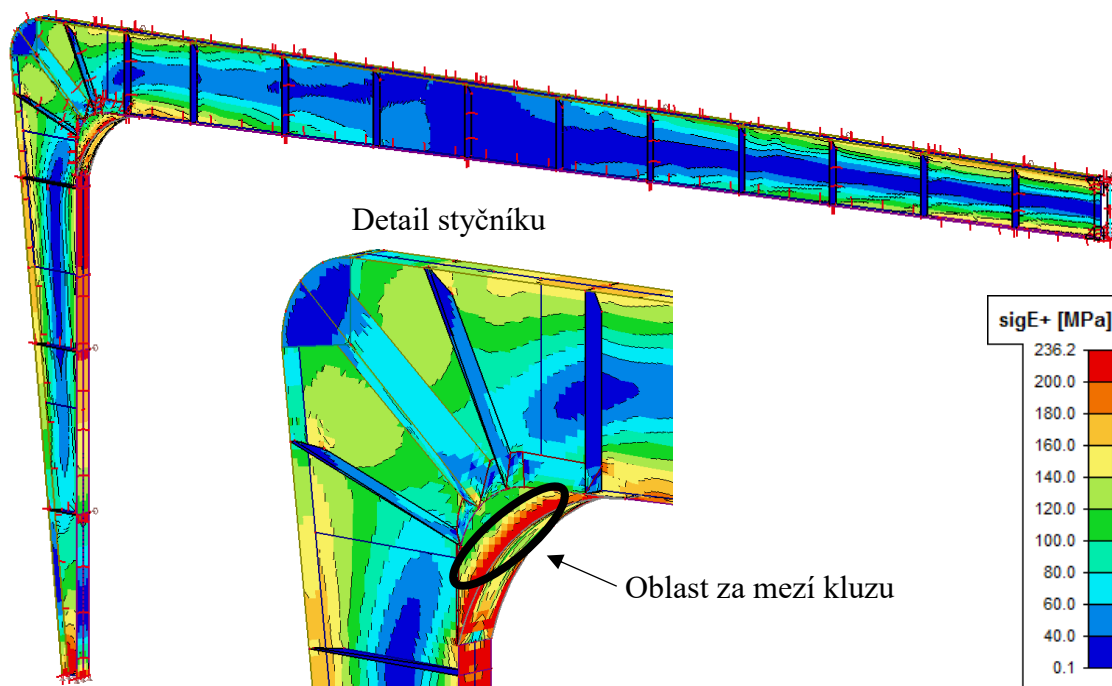
VYHOVÍ

Podmínka plastického přetvoření:

$$\varepsilon_{pl,celk} = \frac{\varepsilon_{pl_M+} + \varepsilon_{pl_M-}}{2} = \frac{0,061 + 0,062}{2} = 0,0615 \%$$

$$\varepsilon_{pl,celk} = 0,0615 \% \leq \varepsilon_{tot} = 0,2 \% \text{ (rezerva 0,1385 \%)}$$

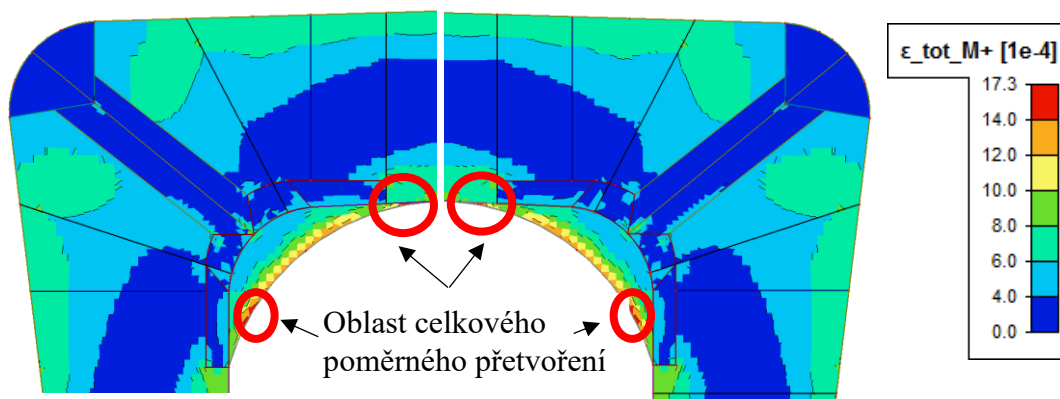
VYHOVÍ



Obrázek 94 - Napětí na rámovém rohu pružno-plastický materiál se zpevněním

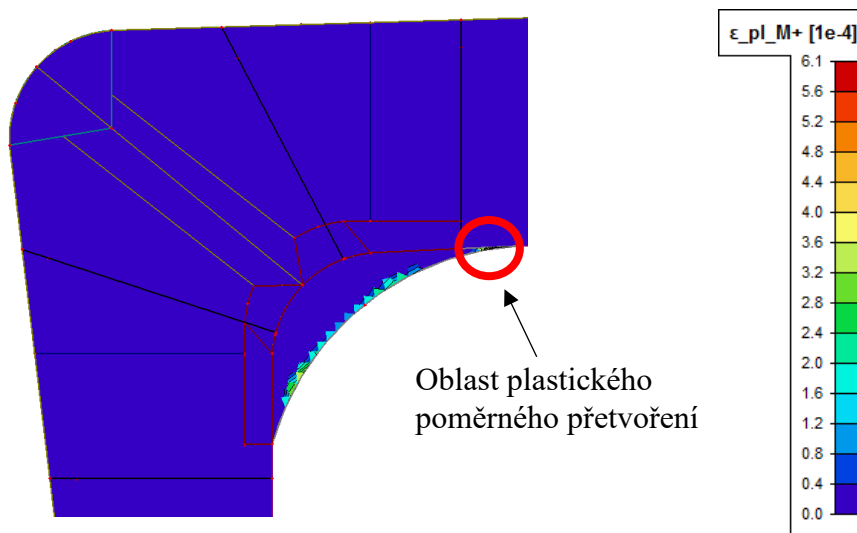
DIPLOMOVÁ PRÁCE

Zatížení zimního stadionu dle numerického modelu vyvolává napětí za mezí kluzu na spodním náběhu konstrukce o cca 1,2 MPa. Na ostatních prvcích, kde byla mez kluzu překročena je výsledná hodnota do 235,5 MPa, tedy s rozdílem maximálně 0,5 MPa. Vzhledem k plastické rezervě je tato hodnota přípustná pro vyhovující posouzení stávajícího styčnicku.

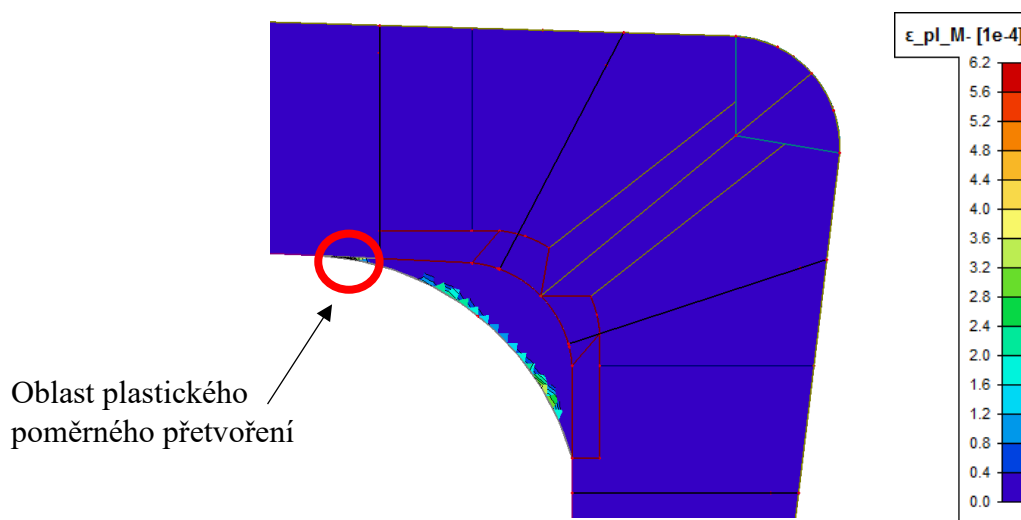


Obrázek 95 - Celkové poměrné přetvoření rámového rohu a) ϵ_{tot_M+} , b) ϵ_{tot_M-} .

Celkové poměrné přetvoření ve srovnání s modelem s ideální pružno-plastickým materiálem je totožné. Jediným rozdílem je poměrné přetvoření v oblasti svaru náběhu se stěnou náběhu, které se tvoří i na povrchu M+, viz Obrázek 94 a).



Obrázek 96 - Plastické poměrné přetvoření rámového rohu ϵ_{pl_M+}

Obrázek 97 - Plasticke poměrné přetvoření rámového rohu ε_{pl_M} .

Oblasti plastických poměrných přetvoření jsou totožné jak u materiálu bez zpevnění.

7.4. Závěr posouzení rámového rohu

Rámový roh byl posouzen z hlediska celkových a plastických poměrných přetvoření, které vznikají důsledkem zatížení zimního stadionu. Zatížení bylo převzato z [8]. Bylo vytvořeno celkem 62 nelineárních kombinací, kde byla vybrána ta, která měla na konstrukci největší účinek.

Dle lineárního výpočtu bylo zjištěno, že nejvíce zatížený prvek konstrukce je spodní pás nosníku pod náběhem, kde byla překročena mez kluzu na cca 240 MPa viz Obrázek 87. V porovnání s ručním výpočtem tohoto napětí je prakticky rovno a vychází s odchylkou 1,1 MPa. Numerické špičky napětí vznikají ve styku náběhu se spodní pásníci příčně o hodnotě 468,2 MPa. Lze uvažovat s plastickou rezervou, proto tedy malé překročení meze kluzu je možné připustit a usoudit, že je daný styčník vyhovující.

Dále byla příčná vazba rámové konstrukce zimního stadionu spočtena nelineárním výpočtem s pružno-plastickým materiálem. Numerický model byl srovnán s prutovým modelem s ohledem na svislou deformaci. Svislý posun byl menší u skořepinového modelu o cca 5%. Tato malá odchylka je dána výztuhami ve skořepinovém modelu, které v prutovém nemohou být zohledněny.

Při výpočtu s ideálně-pružno plastickým materiálem je dosaženo meze kluzu pod náběhem a na náběhu viz Obrázek 90. Vznik celkových poměrných přetvoření, jak je uvedeno na Obrázku 91 a 92 je právě v oblastech dosažení meze kluzu. Avšak

v konstrukci vznikají celková a plastická přetvoření, jejich rezerva je dle [4] 4,82 % a 0,138 %.

Pro zjištění reálného napětí, které v rámové konstrukci vzniká, je zvolen pružno-plastický materiál se zpevněním. Hodnota deformačního zpevnění je dána normou [4] na $E/100$, tedy 2100MPa. Zpevnění nezpůsobilo při stejném zatížení žádné změny ve svislé deformaci oproti materiálu bez zpevnění. Poměrná celková přetvoření byla o jednu tisícinu menší na povrchu M-, tedy také zanedbatelná. Napětí se v tomto modelu dosahuje hodnoty 236,2 MPa viz Obrázek 94. Oblast poměrných a plastických přetvoření je totožná jako u výpočtu s ideálně pružno-plastickým materiálem. Z těchto výsledků lze tedy také konstatovat, obdobně jak u lineárního výpočtu, že díky plastické rezervě, respektive rezervě u poměrných přetvoření je konstrukce vyhovující.

8. Závěr diplomové práce

Cílem práce byla analýza různých numerických modelů ocelových styčníků za využití normových postupů [4],[5] a [6]. Analýza byla prováděna skrze ruční výpočty (Metoda komponent), případně jinými vztahy dané normou [6]. Následně byly výsledky porovnány s lineárními a nelineárními skořepinovými modely, které byly vytvořeny a spočteny v programu Scia Engineer. Numerické modely byly dále vyhodnoceny na základě norem [4] a [5], které udávají podmínky pro poměrná přetvoření a specifikují metodu GMNA.

Šroubovaný rámový roh

V kapitole 5 byl vytvořen šroubovaný rámový roh. Z porovnání analytických a numerických výsledků bylo zjištěno, že pro tento případ je numerický skořepinový model tužší o 20-30% v závislosti na typu styčnicku. Avšak je nutné podotknout, že konstrukční řešení numerického modelu v programu Scia Engineer je velmi variabilní a výsledky se mohou lišit už jen počtem ideálních prvků, které tvoří kontakt mezi pásnicí sloupu se styčnickovým plechem.

V pružno-plastické analýze byl styčník posuzován dle poměrných přetvoření. Tato přetvoření odpovídala již velmi malé rotační tuhosti styčnicku. Za použití ideálně pružno-plastického materiálu je návrhový ohybový moment pro modely 1 a 4 větší, než výsledný ohybový moment z metody komponent. Pro modely 2 a 3 vychází návrhový ohybový moment menší pro numerický model. Výsledné návrhové hodnoty materiálu se zpevněním jsou pro numerický model vždy větší. Tyto výsledky jsou zobrazeny v kapitole 5.4.b) Graf 14.

N styčník příhradové konstrukce

Kapitola 6 obsahuje numerický model svařovaného N styčnicku, který nesplňuje podmínky pro použití normových vztahů. U takového modelu je nutné dbát na vyřešení okrajových podmínek v případě, že se bude styčník řešit samostatně. Vhodnějším řešením je styčník modelovat jako součást celé příhradové konstrukce, kde budou zohledněny všechny okolní napětí a síly, které na daný styčník působit. Dále je nutné posoudit takovýto styčník na plastická poměrná přetvoření, která zde budou dominovat. Jelikož se zde posuzují tažené prvky (diagonála), na rozdíl od kapitoly 5, kde rozhodovala celková poměrná přetvoření. Zároveň se styčník posoudil pro 3 různé případy vyztužení mezi pásnicemi spodního pásu příhradové konstrukce. Z výsledků je zjevné, že výrazný vliv měla výztuha, která se vložila právě do oblasti plastických poměrných deformací.

Pro tento styčník byla k dispozici výpočtová data z programu Ansys, které byly získány z [7]. Jak je možné vidět v kapitolách 6.3.1 a 6.4.1., kde jsou tyto data srovnány právě s použitým programem Scia Engineer. Rozdíl zjištěných výsledků z obou programů je minimální.

Rámový roh zimního stadionu

Posledním posuzovaným styčníkem je stávající rámový roh, který je součástí ocelové nosné konstrukce zimního stadionu v Opavě. Konstrukce byla zatížena reálným zatížením a posouzena dle postupů, které byly použity v přechozích případech. Bylo zjištěno, že prvky rámové konstrukce mírně překračují mez kluzu. Nicméně norma [4], která udává podmínky pro řešení skrze poměrné přetvoření dovolí jít až za hodnotu meze kluzu. Právě díky této plastické rezervě je konečný výsledek vyhovující.

Program Scia Engineer není prozatím schopen řešit výpočty s pomocí objemů, tedy u šroubovaných styčnicků, kde je nutné zajistit kontakt mezi plochami je velmi obtížné získat korektní a přesné výsledky. Jak bylo zmíněno výše pro tento případ byly výsledky různé 20-30 % ve srovnání s normovými postupy [6]. V případě, že se bude analyzovat či posuzovat svařovaný styčník, kde se tento kontakt řešit nebude, jsou výsledky poměrně shodné s výsledky z programu Ansys.

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat svému vedoucímu doc. Ing. Vítu Krivému, Ph. D. za odborné vedení a cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

Seznam použité literatury:

- [1] WALD, František a Zdeněk SOKOL. *Navrhování styčníků*. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-07-02073-8.
- [2] ČSN EN 1991-1-2: *Obecná zatížení - zatížení větrem*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [3] ČSN EN 1993-1-1: *Navrhování ocelových konstrukcí – Obecná pravidla a pravidla pro pozemní stavby*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [4] ČSN EN 1993-1-5: *Navrhování ocelových konstrukcí – Boulení stěn*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [5] ČSN EN 1993-1-6: *Navrhování ocelových konstrukcí – Pevnost a stabilita skořepinových konstrukcí*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2008.
- [6] ČSN EN 1993-1-8: *Navrhování ocelových konstrukcí – Navrhování styčníků*, Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví, 2011.
- [7] JURČÍKOVÁ, Anežka. *Styčníky ocelových konstrukcí: Doporučení pro numerické modelování a stanovení únosnosti vybraných typů styčníků*. Ostrava, 2016. Disertační práce. Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Miroslav Rosmanit, Ph. D.
- [8] KRÍVÝ, Vít, Antonín LOKAJ, a David MIKOLÁŠEK. *Statické posouzení nosných rámu střešní konstrukce zimního stadionu v Opavě*. Ostrava, 2015.
- [9] výkres TP 10955/1 „Zastřešení zimního stadionu v Opavě – Návrh (pro objednávku materiálu, vypracoval Ing. Forejtek, září 1955.

Seznam obrázků:

Obrázek 1 - Graf pro klasifikaci styčníků dle tuhosti	6
Obrázek 2 - Rotační tuhost pro pružnou globální analýzu, a) pro $M_{j,Rd} \leq 2/3 M_{j,Rd}$; b) pro $M_{j,Rd} \leq M_{j,Rd}$	9
Obrázek 3 - Princip použití metody komponent na jednostranném styčniku	10
Obrázek 4 - Paralelní zapojení komponentů	10
Obrázek 5 - Sériové zapojení komponentů	11
Obrázek 6 - Náhradní T profil.....	11
Obrázek 7 - Model porušení se čtyřmi plastickými klouby	12
Obrázek 8 - Model porušení se čtyřmi plastickými klouby s podložkou.....	13
Obrázek 9 - Model porušení se dvěma plastickými klouby	13
Obrázek 10 - Rozměry matice a šroubu	14
Obrázek 11 - Rozměry pro parametr λ	16
Obrázek 12 - Graf pro stanovení účinné délky náhradního T profilu pro šrouby u výztuhy ...	17
Obrázek 13 - Vzdálenost nevyztužené pásnice sloupu	17
Obrázek 14 - Vzdálenost vyztužení pásnice sloupu.....	18
Obrázek 15 - Vzdálenost čelní desky nosníku	19
Obrázek 16 – Rozměry pro příložky stěny sloupu ve smyku.....	20
Obrázek 17 - Řešený rámový roh.....	24
Obrázek 18 - Parametry pro účinné délky.....	25
Obrázek 19 - Řešený rámových roh vytvořený ze střednicových ploch.....	40
Obrázek 20 - Řešení otvorů pro šrouby	41
Obrázek 21 - Řešení styku mezi čelní deskou a pásnicí sloupu.....	42
Obrázek 22 - Model hvězdice pro uchycení šroubů.....	42
Obrázek 23 - Vyztužení konce příčle ideálním prutem.....	43
Obrázek 24 - Celkový skořepinový model s podporami pro stabilitu modelu.....	44
Obrázek 25 - Svislá deformace u_z nevyztuženého styčniku za použití elastického materiálu .	46
Obrázek 26 - Napětí σ_e na nevyztuženém styčniku za použití elastického materiálu.....	46
Obrázek 27 - Svislá deformace u_z vyztuženého styčniku v tlačené oblasti za použití elastického materiálu.....	46
Obrázek 28 - Napětí σ_e na vyztuženém styčniku v tlačené oblasti za použití elastického materiálu.....	47
Obrázek 29 - Svislá deformace u_z vyztuženého styčniku v oblasti obou pásnic příčle za použití elastického materiálu.....	47

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrázek 30 - Napětí σ_e vyztuženého styčnicku v oblasti obou pásnic příčle za použití elastického materiálu.....	47
Obrázek 31 - Normálové síly ve šroubech nevyztuženého styčnicku.....	48
Obrázek 32 - Normálové síly ve šroubech vyztuženého styčnicku v tlačené oblasti	49
Obrázek 33 - Normálové síly vyztuženého styčnicku v oblasti obou pásnic příčle za použití elastického materiálu.....	50
Obrázek 34 - Grafy zpevnění materiálu, a) s plató na mezi kluzu; b) s deformačním zpevněním	51
Obrázek 35 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 1 bez zpevnění	54
Obrázek 36 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 1 se zpevněním.....	54
Obrázek 37 - Napětí na Modelu 1 při 5% přetvoření materiálu	54
Obrázek 38 - Srovnání napětí v materiálu na Modelu 1 při 5% přetvoření a) bez zpevnění ..	55
Obrázek 39 - Smykové napětí τ_{xy} na Modelu 1 při 5% přetvoření a) bez zpevnění b) se zpevněním	55
Obrázek 40 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 2 bez zpevnění	57
Obrázek 41 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 2 se zpevněním.....	58
Obrázek 42 - Napětí na Modelu 2 při 5% přetvoření materiálu	58
Obrázek 43 - Srovnání napětí v materiálu na Modelu 2 při 5% přetvoření a) bez zpevnění....b) bez zpevnění	58
Obrázek 44 - Smykové napětí τ_{xy} na Modelu 2 při 5% přetvoření a) bez zpevnění b) se zpevněním	59
Obrázek 45 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 3 bez zpevnění	60
Obrázek 46 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 3 se zpevněním.....	61
Obrázek 47 - Napětí na Modelu 3 při 5% přetvoření materiálu	61
Obrázek 48 - Srovnání napětí v materiálu na Modelu 3 při 5% přetvoření a) bez zpevnění....b) bez zpevnění	61
Obrázek 49 - Smykové napětí τ_{xy} na Modelu 3 při 5% přetvoření a) bez zpevnění b) se zpevněním	62
Obrázek 50 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 4 bez zpevnění	63
Obrázek 51 - Hlavní poměrné přetvoření ϵ_{tot_M} Modelu 4 se zpevněním.....	64
Obrázek 52 - Napětí na Modelu 3 při 5% přetvoření materiálu	64
Obrázek 53 - Srovnání napětí v materiálu na Modelu 3 při 5% přetvoření a) bez zpevnění....b) bez zpevnění	64

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrázek 54 - Smykové napětí τ_{xy} na Modelu 4 při 5% přetvoření a) bez zpevnění se zpevněním	b) 65
Obrázek 55 - Srovnání průběhu napětí pružno-plastického materiálu na jednotlivých modelech	69
Obrázek 56 - Řešený příhradový nosník tvořen z prutů a styčnick vytvořen ze skořepin	70
Obrázek 57 - Detail řešeného styčnicku	70
Obrázek 58 - Vnitřní síly na prutové příhradové konstrukci	71
Obrázek 59 - Řešení okrajových podmínek pro numerický model N styčnicku	72
Obrázek 60 - Okrajové podmínky skořepinového modelu a) posuvná podpora diagonály b) posuvná podpora v ose z spodního pásu c) neposuvná podpora svislice	72
Obrázek 61 - N a K styčnick dle normy [6]	73
Obrázek 62 - Uzlové zatížení příhradové konstrukce	75
Obrázek 63 - Zatížení diagonály samostatného N styčnicku	75
Obrázek 64 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ε_{pl_M} [%] se zpevněním E 1%	77
Obrázek 65 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ε_{pl_M} [%] ideálně pružno-plastického materiálu	77
Obrázek 66 - Napětí N styčnicku se zpevněním E 1% při 0,2% plastického přetvoření	78
Obrázek 67 - Napětí N styčnicku při 0,2% plastického přetvoření	78
Obrázek 68 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ε_{pl_M-} [%] ideálně pružno-plastického materiálu	81
Obrázek 69 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ε_{pl_M+} [%] ideálně pružno-plastického materiálu	82
Obrázek 70 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ε_{pl_M-} [%] se zpevněním E 1%	82
Obrázek 71 - Hlavní plastické poměrné přetvoření ε_{pl_M+} [%] se zpevněním E 1%	83
Obrázek 72 - Srovnání oblastí plastických poměrných deformací jednotlivých modelů a) model celé příhradové konstrukce b) samostatný N styčnick c) samostatný N styčnick se dvěma silami	85
Obrázek 73 - Model N styčnicku s dvěma výztuhami	89
Obrázek 74 - Plastické přetvoření 0,2% N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami a) styčnick s dvěma výztuhami b) styčnick s jednou výztuhou	91
Obrázek 75 - Plastické přetvoření 0,2% N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami při zpevnění E 1% a) styčnick s dvěma výztuhami b) styčnick s jednou výztuhou	92
Obrázek 76 - Plastické přetvoření 0,2% samostatného N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami a) styčnick s dvěma výztuhami b) styčnick s jednou výztuhou	95

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Obrázek 77 - Plastické přetvoření 0,2% samostatného N styčnicku se zpevněním E 1% s jednou a dvěma výztuhami a) styčnick s dvěma výztuhami b) styčnick s jednou výztuhou.....	96
Obrázek 78 - Model N styčnicku s jednou výztuhou v jiné pozici	102
Obrázek 79 - Plastické přetvoření 0,2% N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami a) styčnick s jednou výztuhou se změnou pozice b) styčnick s dvěma výztuhami	104
Obrázek 80 - Plastické přetvoření 0,2% samostatného N styčnicku s jednou a dvěma výztuhami a) styčnick s jednou výztuhou se změnou pozice b) styčnick s dvěma výztuhami	107
Obrázek 81 - Konstrukce zimního stadionu v Opavě.....	112
Obrázek 82 - Numerický mode příčné vazby zimního stadionu	112
Obrázek 83 - Detail rámového rohu zimního stadionu	112
Obrázek 84 - Detail napojení příčle z prutu k skořepinovému modelu.....	113
Obrázek 85 - Detail bodu vložení zatížení	113
Obrázek 86 - Zatěžování příčné vazby rámové konstrukce reakcemi od vaznic	114
Obrázek 87 - Napětí na rámovém rohu při lineárním výpočtu.....	115
Obrázek 88 - Průřez sloupu v řešeném místě	116
Obrázek 89 - Svislé deformace u_z prutového a skořepinového modelu pro zatížení NC1	117
Obrázek 90 – Napětí na rámovém rohu ideálně pružno-plastický materiál	118
Obrázek 91 - Celkové poměrné přetvoření ε_{tot_M+} rámového rohu.....	118
Obrázek 92 - Celkové poměrné přetvoření ε_{tot_M-} rámového rohu.....	118
Obrázek 93 - Plastické poměrné přetvoření rámového rohu a) ε_{pl_M+} b) ε_{pl_M-}	119
Obrázek 94 - Napětí na rámovém rohu pružno-plastický materiál se zpevněním	120
Obrázek 95 - Celkové poměrné přetvoření rámového rohu a) ε_{tot_M+} , b) ε_{tot_M-}	121
Obrázek 96 - Plastické poměrné přetvoření rámového rohu ε_{pl_M+}	121
Obrázek 97 - Plastické poměrné přetvoření rámového rohu ε_{pl_M-}	122

Seznam tabulek:

Tabulka 1 - Klasifikace a modely styčnicků	8
Tabulka 2 - Součinitel změny tuhosti η	9
Tabulka 3 - Shrnutí porušení	15
Tabulka 4 - Účinné délky nevyztužené pásnice sloupu	17
Tabulka 5 - Účinné délky vyztužené pásnice sloupu	18
Tabulka 6 - Účinné délky pro čelní desku.....	18
Tabulka 7 - Hodnoty převodního součinitele β	21

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 8 - Redukční součinitel ω	21
Tabulka 9 - Srovnávací tabulka výpočtů z metody komponent a skořepinového modelu.....	45
Tabulka 10 - Srovnání tahových sil získaných metodou komponent a skořepinovým modelem	50
Tabulka 11 - Tabulka ohybové únosnosti styčnicku s pružno-plastickým materiálem	52
Tabulka 12 - Tabulka výsledných hodnot z pružno-plastické analýzy Modelu 1	53
Tabulka 13 - Tabulka výsledných hodnot z pružno-plastické analýzy Modelu 2.....	57
Tabulka 14 - Tabulka výsledných hodnot z pružno-plastické analýzy Modelu 3.....	60
Tabulka 15 - Tabulka výsledných hodnot z pružno-plastické analýzy Modelu 4.....	63
Tabulka 16 - Tabulka návrhových sil dle normových postupů	75
Tabulka 17 - Tabulka výsledných hodnot N styčnicku v příhradové konstrukci	76
Tabulka 18 - Tabulka výsledných hodnot N styčnicku se zpevněním v příhradové konstrukci	76
Tabulka 19 - Srovnání návrhových tahových sil pro diagonálu N styčnicku v příhradové konstrukci	77
Tabulka 20 - Tabulka výsledných hodnot samostatného N styčnicku se dvěma silami	80
Tabulka 21 - Tabulka výsledných hodnot samostatného N styčnicku se dvěma silami a se zpevněním	80
Tabulka 22 - Srovnání výsledných hodnot ručního výpočtů a numerického modelu N styčnicku se dvěma silami	81
Tabulka 23 - Porovnání a procentuální vyhodnocení výsledných návrhových sil.....	85
Tabulka 24 - Tabulka výsledných hodnot N styčnicku v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami	90
Tabulka 25- Tabulka výsledných hodnot N styčnicku v příhradové konstrukci se dvěma výztuhami	90
Tabulka 26 - Porovnání výsledků s výpočty styčnicku s dvěma výztuhami dle normy [6].....	91
Tabulka 27 - Porovnání návrhových normálových sil dle numerických modelů s příhradovou konstrukcí	91
Tabulka 28 - Výsledné hodnoty samostatného N styčnicku se dvěma výztuhami	93
Tabulka 29- Výsledné hodnoty samostatného N styčnicku se dvěma výztuhami a se zpevněním E 1%	94
Tabulka 30 - Porovnání výsledků s výpočty samostatného N styčnicku s dvěma výztuhami dle normy [6].....	94
Tabulka 31 - Porovnání návrhových normálových sil dle numerických modelů samostatného styčnicku	95

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Tabulka 32 - Srovnání výsledných hodnot modelů s jednou a dvěma výztuhami	98
Tabulka 33 - Výsledné hodnoty N styčníku v příhradové konstrukci s jednou výztuhou v jiné pozici	102
Tabulka 34 - Výsledné hodnoty N styčníku v příhradové konstrukci s jednou výztuhou v jiné pozici se zpevněním	103
Tabulka 35 - Porovnání výsledků s výpočty N styčníku s jednou výztuhou dle normy [6] ..	103
Tabulka 36 - Porovnání návrhových normálových sil dle numerických modelů s příhradovou konstrukcí	104
Tabulka 37- Výsledné hodnoty samostatného N styčníku s jednou výztuhou v jiné pozici ..	106
Tabulka 38- Výsledné hodnoty samostatného N styčníku s jednou výztuhou v jiné pozici se zpevněním	106
Tabulka 39 - Porovnání výsledků s výpočty N styčníku s jednou výztuhou dle normy [6] ..	107
Tabulka 40 - Porovnání návrhových normálových sil dle numerických modelů samostatného styčníku	107
Tabulka 41 - Srovnání výsledných hodnot modelů s jednou a dvěma výztuhami	109
Tabulka 42 - Porovnání posunů u_z skořepinového modelu a prutového modelu	116
Tabulka 43 - Poměrná přetvoření rámového rohu s ideálně pružno-plastickým materiálem	117
Tabulka 44- Porovnání posunů u_z skořepinového modelu bez a se zpevněním a prutového modelu	119
Tabulka 45 - Poměrná přetvoření rámového rohu s pružno-plastickým materiálem bez a se zpevněním	120

Seznam grafů:

Graf 1 - Elastický materiál, Deformace x Rotační tuhost	45
Graf 2 - Srovnávací graf - Pružno-Plastický materiál závislosti pootočení ϕ a ohybovým momentem	52
Graf 3 - Graf závislosti plastického přetvoření ϵ a zatížení ohybovým momentem Modelu 1 ..s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním	56
Graf 4 - Graf závislosti zatížení ohybovým momentem a deformací u_z Modelu 1 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním	56
Graf 5 - Graf závislosti plastického přetvoření ϵ a zatížení ohybovým momentem Modelu 2 ..s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním	59

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Graf 6 - Graf závislosti zatížení ohybovým momentem a deformací u_z Modelu 2 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním	... 59
Graf 7 - Graf závislosti plastického přetvoření ε a zatížení ohybovým momentem Modelu 3 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním	62
Graf 8 - Graf závislosti zatížení ohybovým momentem a deformací u_z Modelu 3 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním 62
Graf 9 - Graf závislosti plastického přetvoření ε a zatížení ohybovým momentem Modelu 4 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním	65
Graf 10 - Graf závislosti zatížení ohybovým momentem a deformací u_z Modelu 4 s pružno-plastickým materiálem bez zpevnění a se zpevněním 65
Graf 11 - Elastický materiál, Deformace x Rotační tuhost	66
Graf 12 - Srovnávací graf závislosti rotační plastické tuhosti k_ϕ a zatížení ohybovým momentem	67
Graf 13 - Srovnávací graf - Pružno-Plastický materiál v závislosti pootočení ϕ a ohybovým momentem	68
Graf 14 - Srovnávací graf návrhového ohybového momentu dle jednotlivých metod návrhu styčnicku	68
Graf 15 - Graf závislosti celkového poměrného přetvoření ε_{tot_M} a normálovou silou v diagonále N styčnicku s ideálně pružno-plastickým materiálem a se zpevněním E 1%	78
Graf 16 - Graf závislosti svislého posunu spodní pásnice a normálové síly v diagonále N styčnicku s ideálně pružno-plastickým materiálem a se zpevněním E 1%	79
Graf 17 - Graf srovnání analýzy vlivu zpevnění materiálu na poměrné přetvoření N styčnicku v příhradové konstrukci a napětí	79
Graf 18 - Graf závislosti celkového poměrného přetvoření ε_{tot_M} a normálovou silou v diagonále N styčnicku se dvěma silami s ideálně pružno-plastickým materiálem a se zpevněním E 1%	83
Graf 19 - Graf srovnání analýzy vlivu zpevnění materiálu na návrhové hodnoty únosnost diagonály a poměrné přetvoření samostatného N styčnicku se dvěma silami	84
Graf 20 - Graf srovnání modelu příhradové konstrukce a modelu samostatného N styčnicku se dvěma silami se zpevněním 0,2% z E v závislosti napětí a hlavním poměrném přetvoření	86
Graf 21 - Graf srovnání všech numerických modelů normálové síly a celkovém poměrném přetvoření	87

DIPLOMOVÁ PRÁCE

Graf 22 - Silově deformační křivka všech modelů pro ideálně pružno-plastický materiál a materiál se zpevněním E 1%	87
Graf 23 - Graf silově-deformačních křivek srovnání Scia engineer a Ansys pro samostatný model N styčníku se dvěma silami.....	88
Graf 24 - Graf silově-deformačních křivek srovnání Scia engineer a Ansys pro model celé příhradové konstrukce	88
Graf 25 - Srovnání silově-deformačních křivek N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %	92
Graf 26 - Srovnání N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami na základně poměrném přetvoření a normálové síle v diagonále	93
Graf 27- Srovnání silově-deformačních křivek samostatného N styčníku s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %.....	96
Graf 28- Srovnání silově-deformačních křivek samostatného N styčníku s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %.....	97
Graf 29 - Silově-deformační křivky všech modelů s jednou a dvěma výztuhami	99
Graf 30 - Srovnání všech modelů s jednou a dvěma výztuhami	99
Graf 31 - Graf silově-deformačních křivek srovnání Scia engineer a Ansys pro model celé příhradové konstrukce s jednou a dvěma výztuhami	100
Graf 32 - Graf silově-deformačních křivek srovnání Scia engineer a Ansys pro samostatný model N styčníku se dvěma silami s jednou a dvěma výztuhami.....	101
Graf 33 - Srovnání silově-deformačních křivek N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %	105
Graf 34- Srovnání N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami na základně poměrném přetvoření a normálové síle v diagonále	105
Graf 35- Srovnání N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami na základně poměrném přetvoření a normálové síle v diagonále	108
Graf 36 - Srovnání silově-deformačních křivek N styčníku v příhradové konstrukci s jednou a dvěma výztuhami pro plastické přetvoření 0,2 %	108
Graf 37 - Srovnání všech modelů s jednou a dvěma výztuhami	110
Graf 38 - Silově-deformační křivky všech modelů s jednou a dvěma výztuhami	110

Použitý software:

Scia Engineer, AutoCad, Autocad Architecture, Microsoft word, Microsoft excel